

que l'on met en rotation autour d'un axe horizontal A, à l'aide d'une chaîne sans fin qui passe sur la roue R.

L'axe porte une pièce métallique CC' à laquelle sont fixées deux pièces de

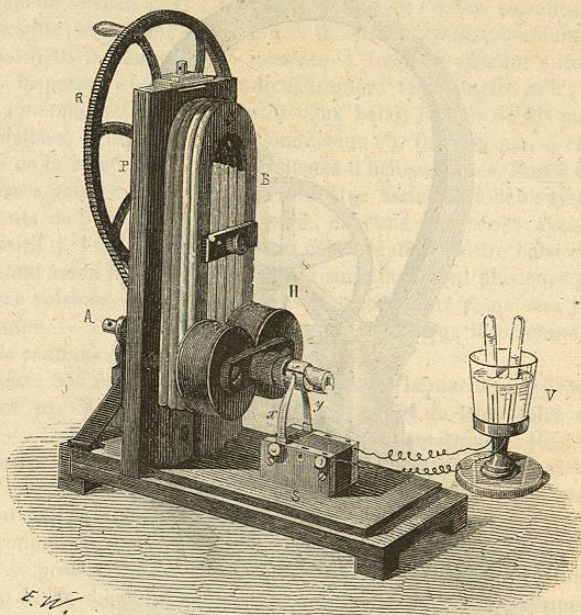


Fig. 657. — Machine de Clarke.

fer doux CD et C'D' qui forment les noyaux des bobines (fig 658). L'une des extrémités du fil de la bobine CD est fixée à l'axe, l'autre extrémité est soudée à une virole E, isolée de l'axe métallique par un cylindre en ivoire; il en est de même de l'autre bobine C'D', mais le sens de l'enroulement est interverti: sur CD, le fil s'enroule, en dessus, de gauche à droite; sur C'D' il s'enroule de droite à gauche. Deux ressorts *x* et *y* font communiquer la virole et l'axe avec les deux extrémités d'un conducteur M.

Supposons que l'on fasse tourner les bobines autour de l'axe, dans le sens des aiguilles d'une montre, et considérons, en particulier, la bobine CD pendant qu'elle effectue une première demi-révolution, *au-dessous* du plan horizontal *ba*, s'éloignant ainsi du pôle *b*, et s'approchant du pôle *a*. D'après la loi de Lenz (867), le courant induit doit contrarier le mouvement, c'est-à-dire qu'il doit avoir un sens tel, que la bobine CD devienne un solénoïde ayant un pôle austral en C (pôle attiré par *b* et repoussé par *a*) (fig. 658). Le courant induit doit donc avoir sa gauche du côté C; il se rend à la virole, et va dans le conducteur M, de *x* vers *y*. — Quant à l'autre bobine C'D', elle se déplace *au-dessus* du plan horizontal *ab*, s'éloignant de *a* et s'approchant en même temps de *b*; dès lors, si le sens de l'enroulement du fil était le

même pour les deux bobines, les deux courants induits seraient de sens inverse, et s'annuleraient dans le conducteur M; l'inversion du sens de l'enroulement a pour effet d'amener les deux courants induits à parcourir le conducteur M dans le même sens.

Quand la bobine CD a dépassé le pôle austral, elle effectue une deuxième demi-révolution, *au-dessus* du plan horizontal *ab*, en s'éloignant du pôle *a*, et se rapprochant de *b*; donc, d'après la loi de Lenz, le courant induit doit constituer dans cette bobine un solénoïde ayant son pôle boréal en C (pôle attiré par *a* et repoussé par *b*). Le courant, ayant ainsi sa droite du côté C, passe maintenant de la bobine à l'axe, et marche, dans le conducteur M, de *y* vers *x*. — Le même raisonnement montre que, dans la bobine C'D', le courant induit pendant cette deuxième demi-révolution, est également dirigé de *y* vers *x*, dans le conducteur M.

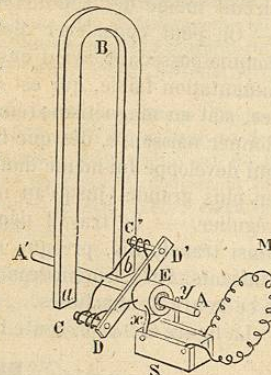


Fig. 658.

En résumé, la machine de Clarke est à courants alternatifs: il y a inversion du courant dans le conducteur extérieur M, au moment où le plan déterminé par les axes des bobines devient horizontal. A ce moment, l'intensité du courant est nulle: elle est maximum, dans un sens ou dans l'autre, lorsque ce plan devient vertical.

Si l'on veut, avec cette machine, produire des effets d'électrolyse, comme la décomposition de l'eau ou des sels métalliques, il faut faire usage d'un commutateur, placé sur l'axe de rotation (fig. 657), pour amener les courants successifs à traverser toujours l'électrolyte dans le même sens.

887. Machine de l'Alliance. — Dans la pratique industrielle, et notamment pour l'éclairage électrique, les courants alternatifs présentent certains avantages. La première machine industrielle à courants alternatifs qui ait été réalisée est fondée sur le principe de la machine de Clarke: elle a été construite par la Compagnie l'Alliance, pour l'éclairage électrique des phares.

La machine comprend jusqu'à quarante aimants en fer à cheval, assujettis autour d'un même axe horizontal, et répartis en cinq groupes, comprenant chacun huit aimants dans un même plan vertical. — Les bobines induites sont fixées sur un tambour intérieur, dont l'axe est horizontal, et auquel une machine à vapeur imprime un mouvement de rotation rapide. Ces bobines sont associées les unes aux autres comme les éléments d'une pile, de manière à former une seule série. — Cette machine fonctionne avec une régularité remarquable.

888. Machine dynamo-électrique de Gramme, à courants continus. — Une machine dynamo-électrique diffère d'une machine magnéto-électrique en ce que l'inducteur, au lieu d'être un système d'aimants, est un système d'électro-aimants, ce qui permet d'obtenir, à dimensions égales, un champ électrique d'une bien plus grande intensité.

Pour développer le magnétisme dans l'électro-aimant inducteur, on peut employer un courant électrique distinct, produit par une machine

magnéto-électrique auxiliaire. Mais, dans la plupart des cas, on évite cette complication en introduisant le fil de l'électro-aimant dans le circuit même des conducteurs que doit parcourir le courant induit. — On peut considérer alors le noyau de l'électro-aimant inducteur comme possédant, avant que la machine soit mise en mouvement, une aimantation faible, qui est due, soit à l'action du magnétisme terrestre, soit au magnétisme rémanent. Cette faible aimantation suffit pour donner naissance, dès que la rotation commence, à un courant induit, qui développe lui-même dans l'électro-aimant une aimantation de plus en plus grande, jusqu'au moment où la machine atteint son régime régulier. — Le travail dépensé pour faire mouvoir la machine est ainsi transformé, presque sans intermédiaire, en une succession de courants. De là, le nom de *machines dynamo-électriques* qui a été donné à ce genre de machines.

La figure 659 représente l'une des dispositions des machines dynamo-

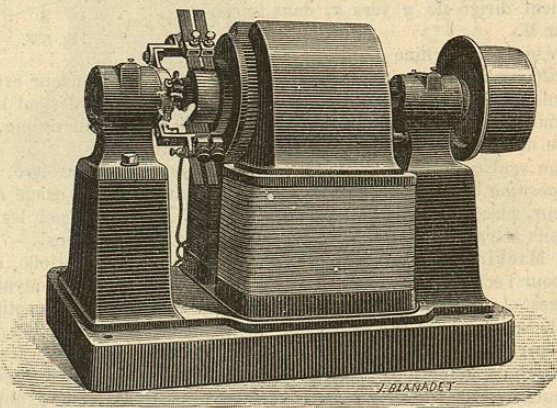


Fig. 659. — Machine dynamo-électrique de Gramme, à courants continus.

électriques de Gramme : c'est celle qu'on désigne dans l'industrie sous le nom de *type supérieur*, parce que c'est à la partie supérieure de la machine qu'est disposé l'anneau, dans une cavité cylindrique ménagée dans les deux armatures d'un électro-aimant en fer à cheval. — La plaque de fondation, les noyaux des électro-aimants, leurs pièces polaires et les supports de l'axe de rotation, sont fondus d'une seule pièce, ce qui rend l'appareil très robuste.

Une machine de ce type, pesant 4000 kilogrammes, et dans laquelle l'anneau fait 450 tours par minute, peut fournir un courant de 600 ampères, avec une force électromotrice de 110 volts. Dans ces conditions, 600 coulombs circulent dans la machine en une seconde; il en résulte que le travail dépensé,

par seconde, pour produire le courant, doit être de 600×110 ou 66 000 joules. Autrement dit, pour actionner ce générateur de courants, il faut employer un moteur à vapeur, ou un moteur hydraulique, dont la puissance serait au moins de 66 000 watts, ou de 90 chevaux-vapeur. (Le cheval-vapeur vaut 736 watts). — Les plus puissantes machines dynamo-électriques à courants continus permettent d'atteindre, soit une intensité de 1000 ampères, soit une force électro-motrice de 2000 volts.

Remarque. — En général, si, pendant la marche d'une machine d'induction, la force électromotrice est de E volts, et si l'intensité du courant est de i ampères, la puissance absorbée par cette production d'électricité est de Ei watts. — En réalité, la puissance du moteur qui imprime le mouvement aux organes de la machine doit être un peu supérieure à cette valeur, en raison des pertes d'énergie mécanique, par les frottements.

889. Machine dynamo-électrique de Gramme, à courants alternatifs. — Les figures 660 et 661 représentent la disposition donnée à la machine Gramme, pour recueillir des courants alternatifs, et en même temps pour obtenir plusieurs circuits indépendants, avec chacun desquels on pourra, par exemple, alimenter un certain nombre de foyers de lumière électrique.

Ce sont ici les électro-aimants inducteurs qui sont mobiles; ils sont excités par le courant que produit une machine dynamo-électrique auxiliaire, à courant continu. Sur l'axe de rotation sont disposés huit électro-aimants droits (fig. 660), dont les pôles N. S., N. S... sont alternés. L'anneau

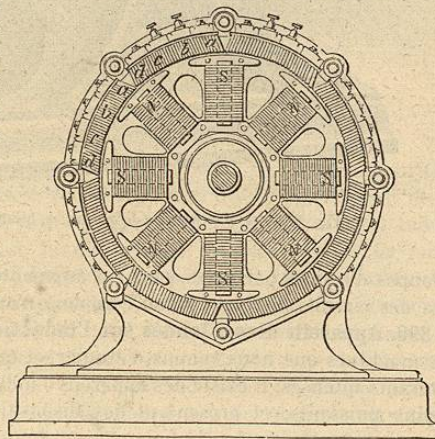


Fig. 660. — Disposition de la machine de Gramme à courants alternatifs.

qui porte les hélices induites est extérieur aux électro-aimants, et fixe : les balais sont supprimés. Les hélices de l'anneau sont au nombre de huit, comme le montre la figure; mais chacune d'elles est décomposée en quatre hélices distinctes, a, b, c, d . On réunit entre elles toutes les hélices a , de manière à en former, avec un conducteur extérieur, un premier circuit; puis, les hélices b , de manière à en former un second circuit; et de même pour les hélices c , et pour les hélices d . Chacun des groupes d'hélices éprouvant, pendant le mouvement, la même succession d'influences de la part des pôles alternés des électro-aimants, chacun de ces quatre groupes constitue un générateur indé-

pendant de courants alternatifs. — En multipliant plus ou moins les

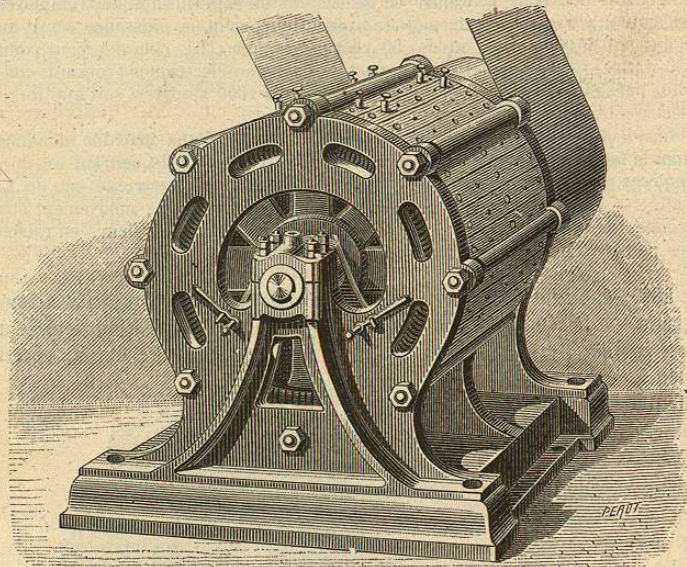


Fig. 661. — Machine de Gramme, à courants alternatifs.

groupes d'hélices partielles, on peut augmenter plus ou moins le nombre des circuits distincts, selon l'emploi qu'on en veut faire.

890. Appareils divers fondés sur l'induction magnétique. — Outre les machines que nous venons d'étudier, et qui servent à produire des courants intenses, il existe des appareils d'induction magnéto-électrique moins puissants, et présentant des dispositions variables suivant les usages auxquels on les destine.

Ainsi, le téléphone de Bell (880) est évidemment un appareil d'induction magnéto-électrique. — Pour l'électro-thérapie, c'est-à-dire pour le traitement de certaines maladies par l'électricité, on fait usage d'appareils magnéto-électriques, présentant une assez grande analogie avec la machine de Clarke.

Enfin, il est des circonstances où l'on n'a besoin que d'un courant d'une durée très courte, mais d'une assez grande intensité, pour produire un effet déterminé (explosion d'une mine ou d'une torpille, mouvement à imprimer à un signal mobile, etc.). On fait alors usage d'appareils d'une construction particulièrement simple, dans lesquels le courant est produit par le déplacement brusque d'une bobine, au voisinage d'un aimant. — Nous citerons comme exemple l'inducteur

Postel-Vinay (fig. 662), qui est employé sur certaines lignes de chemins de fer pour transmettre des signaux d'une station à l'autre.

Entre les deux pôles A et B d'un aimant, se trouve une bobine dont le noyau de fer doux CD sert d'armure à l'aimant. En agissant sur la manivelle M, on fait d'abord décrire à la bobine, assez lentement, une demi-révolution autour de l'axe H, qui est parallèle aux branches de l'aimant : on communique ainsi une tension à un ressort spiral, disposé à l'intérieur du cylindre R. Si l'on abandonne alors brusquement

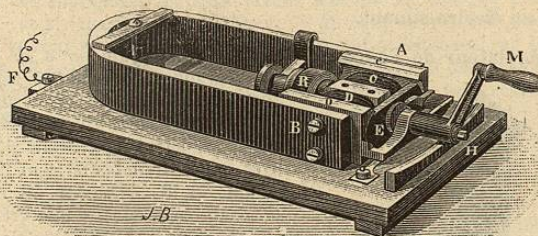


Fig. 662. — Inducteur Postel-Vinay.

la manivelle, le système, sollicité par le ressort, revient rapidement à sa position primitive : le sens de l'aimantation du noyau CD étant brusquement interverti, il en résulte, dans la bobine, un courant induit d'autant plus intense que le mouvement est plus rapide. La force électromotrice du courant (différence des potentiels des deux extrémités du fil de la bobine) peut atteindre 300 volts. — L'une des extrémités du fil de la bobine est soudée à l'axe H, l'autre à une virole en cuivre E, isolée de l'axe. On recueille le courant au moyen de ressorts frotteurs, convenablement disposés. — L'appareil inducteur de chaque station communique, par un fil télégraphique, avec une sonnerie électrique placée à la station suivante, la terre servant de fil de retour. A chaque déplacement brusque de la bobine, correspond un choc du marteau sur le timbre, c'est-à-dire un appel. — Chacun des signaux à transmettre est représenté conventionnellement par un nombre déterminé d'appels successifs.

V. — ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE.

891. Éclairage par l'arc voltaïque. — Lampes à arc. — L'arc voltaïque, dont nous avons décrit les principales propriétés (785), constitue une source de lumière très intense, qui a été utilisée pour l'éclairage, dans les lampes électriques à arc.

Les courants employés, produits par une machine d'induction, peuvent être continus ou alternatifs. — Quand on emploie une pile de Bunsen, il faut au moins 40 éléments, associés en série, pour obtenir un arc voltaïque ayant une intensité lumineuse suffisante (*).

Pour que, dans une *lampe à arc*, la lumière conserve une intensité constante, il est nécessaire que les extrémités des baguettes de charbon, malgré leur usure progressive, soient maintenues toujours à une même distance. — Cette condition est réalisée, dans les divers systèmes de *lampes à arc*, au moyen d'*appareils régulateurs* dont la partie essentielle est un électro-aimant.

892. Régulateur de Foucault. — Le premier *régulateur* a été imaginé par Foucault. La figure 665 représente cet appareil, avec les modifications qui y ont été apportées par Duboscq.

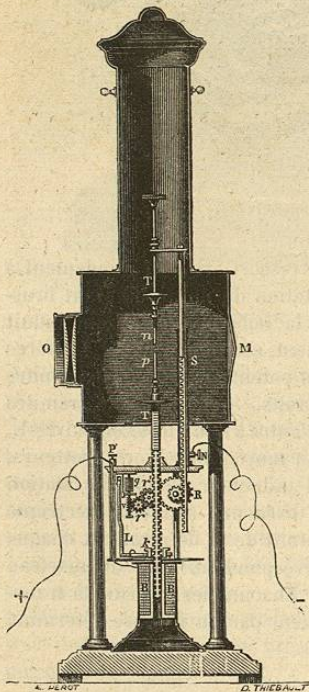


Fig. 665.
Régulateur de la lumière électrique.

Le fil métallique est représenté par sa section en BB : l'une des extrémités de ce fil part du bouton P et est mise en communication avec le pôle positif

(*) Dans ces conditions, l'intensité lumineuse de l'arc vaut 100 carcels, ou 1000 bougies décimales (livre IV, chap. 1) ; l'intensité du courant *continu* est d'environ 15 am-

de la pile ; l'autre extrémité communique avec la plaque métallique qui forme la base de la bobine, et par suite avec la tige T, qui passe à frottement doux à travers cette plaque. On voit que, quand les charbons sont au contact, ou situés encore à une faible distance, le courant, arrivant par le bouton P, parcourt le fil de la bobine, passe dans la tige T, franchit l'intervalle qui sépare *p* de *n*, et revient à la pile par la tige S et le bouton N. Or, le courant aimantant le noyau de la bobine, celui-ci attire l'anneau de fer doux *k* et la branche horizontale du levier L à laquelle l'anneau est fixé ; la branche verticale de ce levier est alors mise en mouvement de gauche à droite, et vient buter contre une roue dentée horizontale, fixée à l'axe de la vis *v*. Tout le système des engrenages est ainsi arrêté tant que le courant conserve son intensité, et les charbons restent fixes. — Au contraire, quand l'intensité du courant et celle de la lumière produite viennent à diminuer par l'usure des charbons, le magnétisme développé dans l'électro-aimant diminue, et il arrive un moment où le contact *k*, obéissant à l'action d'un petit ressort métallique qu'on aperçoit au-dessous de lui, s'éloigne de l'électro-aimant : la branche verticale du levier L s'écarte alors de la roue dentée qu'elle arrêta, et tout le système des engrenages, se mettant en mouvement, produit un rapprochement des charbons *p* et *n*. On conçoit qu'il résulte, de ce rapprochement même, une augmentation dans l'intensité du courant et dans la force magnétique de l'électro-aimant, de sorte que le contact *k* est bientôt attiré de nouveau, le système des engrenages s'arrête, et ainsi de suite (*).

Lorsqu'on veut projeter la lumière dans une direction déterminée, on place l'appareil, comme le représente la figure 665, dans une boîte métallique rectangulaire, qui porte, dans l'une de ses faces verticales, une ouverture garnie d'un système de lentilles O. — A l'intérieur de la boîte, sur la face opposée à l'ouverture, est un miroir concave M, qui renvoie vers les lentilles la lumière qu'il reçoit.

893. Régulateurs fonctionnant sans mécanisme. — **Expériences de M. E. Fernet.** — Au commencement de l'année 1866, M. E. Fernet publia une disposition destinée à supprimer tout mécanisme, pour la production et le réglage de la lumière électrique.

Une tige métallique horizontale est suspendue par deux fils de soie fixés, de part et d'autre, à une petite distance de son milieu, de manière qu'une force très faible suffit pour l'écarter de sa position d'équilibre. A l'extrémité de cette tige, et perpendiculairement à sa direction, est assujéti l'un des charbons, dirigé lui-même horizontalement ; l'autre charbon est placé en regard, dans une position fixe, et tangentiellement à l'arc de cercle que décrit l'extrémité

pères. — La résistance de l'arc est d'environ $1^{mm},55$; si l'on calcule alors la différence de potentiel des deux pointes de charbon, par la formule $i = \frac{V}{R}$, on trouve 20 volts. —

M. Edlund a démontré que l'arc voltaïque donne naissance à une force électromotrice d'environ 50 volts, qui est en *sens inverse* de celle de la pile ; le courant de la pile doit donc produire, aux deux extrémités des charbons, une chute de potentiel de 50 volts. La perte d'énergie correspondante à la production de la lumière est donc de 15×50 joules par seconde (802) ; en d'autres termes, l'éclairage par l'arc voltaïque absorbe, par carcel, une puissance mécanique de 7,5 watts.

(*) Le pignon de la roue R a un nombre de dents égal à la moitié du nombre des dents de la roue elle-même : il en résulte que, à chaque mouvement effectué par la roue, le point *n* descend d'une quantité qui est la moitié de celle dont le point *p* s'élève ; le pôle positif s'usant à peu près deux fois plus vite que le pôle négatif, la position de ces extrémités dans l'espace reste ainsi sensiblement constante.

du charbon mobile, dans son mouvement. L'un des pôles est mis en communication avec le charbon fixe; l'autre pôle, avec la tige métallique, au moyen d'une pointe verticale, fixée au milieu de cette tige et plongeant dans un petit godet de mercure. — Les pointes des deux charbons étant amenées au contact, on tord le système des fils de suspension, de manière à appuyer les pointes des deux charbons l'une contre l'autre; dès que le circuit est fermé, on voit le charbon mobile s'écarter du charbon fixe, en vertu de la force répulsive qui s'exerce entre deux portions consécutives d'un même courant (note de la page 682); il se forme donc un arc électrique, et comme la force de torsion augmente avec l'angle d'écart, on obtient bientôt une position d'équilibre.

Cet équilibre est stable; puisque tout accroissement de distance des charbons diminue la force répulsive et augmente la force de torsion, tandis qu'un rapprochement diminue la force de torsion et augmente la force répulsive. L'usure des charbons fait passer le charbon mobile, d'une manière continue, par une série de positions d'équilibre: les extrémités des charbons conservent entre elles une distance sensiblement constante, pendant un temps très long.

L'appareil peut d'ailleurs être employé soit avec une pile électrique, soit avec les machines d'induction, à courants continus ou à courants alternatifs. Mais il a, comme défaut, sa sensibilité même; il ne peut fonctionner régulièrement que sur un support à peu près immobile: des trépidations un peu fortes, imprimées au sol sur lequel il est placé, suffisent pour amener des irrégularités dans la lumière (*).

894 Bougie électrique de M. Jablochkoff. — L'idée essentiellement pratique, et d'une remarquable simplicité, qui est due à M. Jablochkoff (1876), consiste à placer les deux charbons *parallèlement entre eux, dans une position fixe* (fig. 660), de manière que la combustion simultanée de leurs deux extrémités laisse toujours à une même distance les points entre lesquels doit se produire l'arc électrique. Pour obliger l'arc à jaillir toujours entre les extrémités libres, il suffit de séparer les charbons, dans toute leur longueur, par un corps isolant, tel que le kaolin, qui soit suffisamment fusible, à la température élevée de l'arc électrique, pour dégager successivement les deux baguettes.

« Ces deux charbons et le corps isolant constituent, à proprement parler, dit M. Jablochkoff, une *bougie électrique*, qui se place dans un chandelier spécial. Ce chandelier se compose de deux pièces métalliques S, A, isolées l'une de l'autre, et montées sur une base d'ardoise ou de quelque autre matière. Ces deux pièces constituent une pince, dans laquelle les deux charbons sont serrés par un ressort r, de manière à établir un

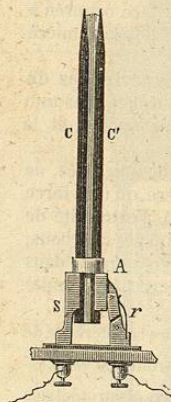


Fig. 661.
Bougie Jablochkoff.

(*) Divers essais ont été faits par M. Fernet, pour réaliser la mobilité de la tige avec d'autres dispositions; par exemple, en l'assujettissant à un axe métallique légèrement incliné sur la verticale, de manière qu'elle tende à prendre, sous l'action de son poids, la direction de la ligne de plus grande pente, dans le plan qu'elle décrit.

bon contact. Les deux fils, qui amènent le courant, aboutissent à cette pince. »

Pour allumer la bougie, il faut, si elle est à portée de la main, établir la continuité entre les charbons en plaçant, pendant quelques secondes, sur le sommet de la bougie, un morceau de mine de crayon. — Si la bougie doit être allumée à distance, on place à l'avance, entre les extrémités des charbons, un petit fil métallique fin, un morceau de plomb ou un fragment de mine: dès que le courant est établi, la fusion ou la combustion de ce corps conducteur supprime la continuité, et l'arc voltaïque reste établi (*).

Pour éviter l'usure inégale des deux charbons, il faut employer des machines à courants alternatifs.

895. Éclairage par un fil conducteur porté à l'incandescence. — **Système Edison.** — L'Exposition d'électricité qui a eu lieu en 1881 a fait connaître en France un mode d'éclairage électrique qui permet de multiplier les foyers de lumière, en donnant à chacun d'eux moins d'intensité. — Il est introduit aujourd'hui jusque dans les usages domestiques.

Dans la disposition imaginée par M. Edison, de New-York, le courant passe dans un fil de charbon C (fig. 665), de la grosseur d'un crin de cheval, placé dans un petit globe de verre où l'on a fait un vide aussi parfait que possible. Ce fil a été obtenu par la carbonisation d'un filament découpé dans une tige de bambou: il est recourbé et fixé par ses extrémités à deux fils de platine, isolés l'un de l'autre, qui servent de conducteurs. — Le fil de charbon, porté à une vive incandescence par le courant, produit une lumière d'un jaune doré. Si le vide a été bien fait dans le globe de verre, le charbon ne brûle pas, puisqu'il ne trouve pas d'oxygène dans l'espace qui l'entoure (**).

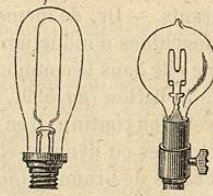


Fig. 665. Lampe Edison. Fig. 666. Lampe Maxim.

dans son mouvement: la force antagoniste de la répulsion électrique peut alors être rendue très petite, en réglant l'inclinaison de l'axe de rotation. — L'appareil, ainsi disposé, se dérange moins facilement que le précédent; il exige cependant toujours une installation sur un sol à peu près immobile.

(*) Une bougie Jablochkoff, fonctionnant normalement, doit avoir une intensité lumineuse de 40 carrels ou 400 bougies décimales (liv. V, chap. 1). — Pour qu'il en soit ainsi le courant doit avoir une intensité de 9 ampères, et la différence de potentiel aux deux bornes de la bougie doit être égal à 42 volts. Quant à l'énergie dépensée par le courant pour la production de cette quantité de lumière, elle est égale à 9×42 ou 378 joules par seconde; en d'autres termes, l'éclairage par la bougie Jablochkoff absorbe une puissance mécanique de 9,4 watts par carrel.

(**) L'expérience a montré cependant que la durée d'un même fil n'est pas indéfinie quand il a fonctionné, à divers intervalles, pendant 600 à 900 heures, il éprouve une désorganisation qui en détermine la rupture; il faut alors le renouveler.

On a imaginé un grand nombre de dispositions analogues à la précédente. — La figure 666 représente la *lampe Maxim*, dans laquelle le fil de charbon est plusieurs fois replié sur lui-même; il provient de la carbonisation d'une bande mince de carton bristol. Le globe a été rempli d'un gaz hydrocarboné, dans lequel la combustion ne peut s'effectuer. Une clef, placée à la base du globe, et présentant la forme du robinet d'un bec de gaz, permet d'établir ou d'interrompre le courant, de manière à allumer ou à éteindre la lampe.

Les courants destinés à alimenter ces foyers de lumière peuvent être produits, soit par des accumulateurs (778), soit par des machines de Gramme ou par d'autres machines dynamo-électriques (*).

VI. — TRANSPORT DU TRAVAIL PAR LES COURANTS ÉLECTRIQUES.

896. Réversibilité des machines magnéto-électriques et dynamo-électriques. — Transport du travail. — On a vu dans ce qui précède, comment l'application d'une force motrice à une machine d'induction donne naissance à une succession de courants électriques: c'est une *transformation du travail mécanique en énergie électrique*, sous forme de courants. — Or, de même que les machines de Holtz ou de Wimshurst, les machines d'induction sont *réversibles*: si l'on fait passer le courant d'une pile dans le conducteur d'un disque de Faraday (fig. 655) ou d'une roue de Barlow (fig. 599), le disque ou la roue acquièrent un mouvement de rotation continu. Il en est de même de toutes les machines magnéto-électriques ou dynamo-électriques: si l'on fait passer, dans l'une des machines de Gramme (fig. 656, 659), un courant suffisamment intense, produit par une pile, on voit la machine se mettre en mouvement; et ce mouvement peut être utilisé pour la production d'un travail mécanique; c'est une *transformation de l'énergie électrique du courant de*

(*) On construit deux types de lampes Edison, dont les intensités lumineuses sont respectivement 2 carrels ou 20 bougies et 1 carrel ou 10 bougies (liv. IV, chap. 1). — La lampe de grand modèle exige un courant de 0 amp. 64; la différence de potentiel aux deux bornes est de 90 volts, et la résistance du fil de charbon (quand la lampe est allumée) est de 140 ohms. Pour le petit modèle, ces deux dernières quantités sont réduites de moitié. — L'énergie dépensée par le courant pour produire 2 carrels, dans la lampe de grand modèle est donc $0,64 \times 90 = 58$ joules par seconde. Cet éclairage absorbe donc une puissance mécanique de 29 watts par carrel.

Il en résulte que l'éclairage par les lampes à incandescence est plus coûteux que l'éclairage par l'arc voltaïque. En effet, en se reportant aux notes des pages 742 et 743, on voit que la puissance mécanique absorbée, par carrel, est:

29	watts pour les lampes Edison;
9,4	— pour les bougies Jablochhoff;
7,5	— pour les lampes à régulateur.

Le prix de revient de l'éclairage électrique est donc d'autant plus élevé que la lumière est répartie en un plus grand nombre de foyers.

la pile, *en travail*. — La machine, actionnée par un courant, devient alors un *moteur électrique*, et fonctionne comme un *moteur à vapeur* actionné par la force élastique d'une vapeur, ou comme un *moteur hydraulique* actionné par la force vive d'une chute d'eau.

Mais le courant électrique qui actionne un pareil moteur peut être fourni par une autre machine semblable, et l'on est ainsi conduit à réaliser la combinaison suivante: — Deux machines, dynamo-électriques ou magnéto-électriques, auront leurs fils réunis entre eux par un circuit conducteur. L'une d'elles sera mise en mouvement par un moteur quelconque, et se comportera comme un *générateur* de courants électriques: ce sera la *machine génératrice*. L'autre machine, recevant le courant produit par la première, prendra le nom de *machine réceptrice*: sous l'action de ce courant, elle se mettra en mouvement, et se comportera comme un moteur électrique, permettant d'effectuer tel ou tel travail.

L'expérience est facile à faire, dans les cours, avec deux machines de Gramme (fig. 656). — Elle fut faite pour la première fois en 1875, à l'Exposition de Vienne, par M. H. Fontaine. La génératrice était mise en mouvement par un moteur à gaz; le courant était transmis à une autre machine, située à une distance de 1 kilomètre; le mouvement de la réceptrice faisait fonctionner une pompe.

Il est facile de concevoir quelle peut être, pour l'industrie, l'importance du transport du travail par les courants électriques. Une solution complètement pratique de ce problème permettrait d'utiliser de nombreuses force motrices naturelles, comme des chutes d'eau, restées jusqu'ici sans emploi en raison de leur éloignement par rapport aux grands centres industriels. — Dans les expériences qui ont été faites récemment entre Lauffen et Francfort-sur-le-Mein, la génératrice installée à Lauffen était actionnée par la chute du Rhin: la puissance mise en jeu était d'environ 500 chevaux-vapeur; les courants étaient transmis à une réceptrice installée à Francfort, à une distance de 175 kilomètres; d'après les mesures effectuées, on obtint à Francfort une fraction notable de cette puissance (*).

897. Coefficient de rendement. — Quand on effectue ainsi le transport du travail, on ne retrouve jamais, dans le travail effectué par la

(*) Les courants alternatifs produits par la génératrice étaient transmis à la réceptrice par trois fils de ligne: c'est la disposition désignée sous le nom de *courants triphasés* (901). — La génératrice fournissant directement des courants de grande intensité et de faible force électromotrice, on les transformait, à l'aide de bobines d'induction construites comme celle de la figure 642, en courants de très grande force électromotrice (20 000 à 50 000 volts) et d'intensité relativement faible; on pouvait alors transmettre ces courants à grande distance, par des conducteurs de faible section, sans que la perte d'énergie fût trop considérable (900). — Enfin, au point d'arrivée, avant d'actionner la réceptrice, ces courants étaient convertis de nouveau, au moyen de *transformateurs* (900), en courants de grande intensité.

réceptrice, la totalité du travail dépensé sur la génératrice pendant le même temps. On appelle *coefficient de rendement*, ou simplement *rendement*, le rapport de la quantité d'énergie électrique transformée, par la réceptrice, en travail mécanique utilisable, à la quantité d'énergie électrique communiquée pendant le même temps à la génératrice, par une dépense de travail mécanique.

Le rendement est évidemment toujours inférieur à l'unité : même avec les machines les plus parfaites, il y a toujours perte d'énergie, sous forme de chaleur dégagée dans les conducteurs ; de plus, on ne saurait supprimer complètement les vibrations et les chocs des divers organes des machines.

898. Expression du coefficient de rendement. — Considérons, par exemple, la combinaison représentée par la figure 667. Deux disques de

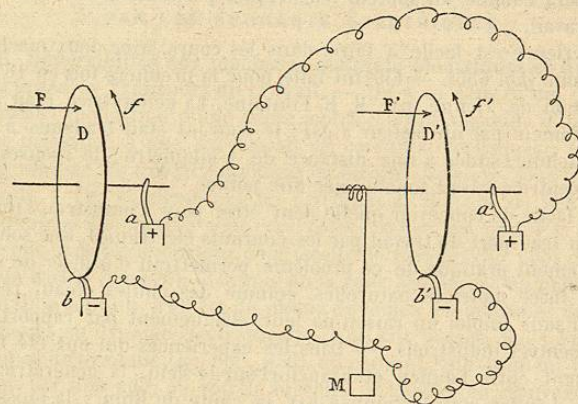


Fig. 667.

Faraday D et D' sont réunis entre eux par des fils conducteurs, de a en a', et de b en b'. Lorsque le disque D, placé dans un champ magnétique F, est animé d'un mouvement de rotation uniforme, dans le sens de la flèche f, il est assimilable à une pile dont a serait le pôle positif et b le pôle négatif (884). Le courant ainsi produit, en passant dans le disque D', est descendant dans celui des rayons du disque qui vient toucher le ressort b' ; sous l'action du champ magnétique F', ce courant tend à se déplacer vers sa droite, en sorte que le disque D' se met en mouvement dans le sens de la flèche f', malgré la résistance opposée par le poids de la masse M, qui est soulevée progressivement. Une partie du travail absorbé par D est ainsi restituée par le disque D' : la vitesse de rotation du disque D' est d'ailleurs moindre que celle de D.

Pour obtenir une expression de l'intensité du courant, on remarquera que les deux disques en mouvement se comportent comme deux piles, dont les pôles positifs seraient en a pour le disque D, en a' pour le disque D', et dont les forces électromotrices E et E' seraient de sens contraires : leur

résultante est $E - E'$. Si R est la résistance totale du circuit, évaluée en ohms, l'intensité du courant, évaluée en ampères, sera $i = \frac{E - E'}{R}$ (*).

Il est facile d'en déduire une expression du rendement. — En effet, dire que la force électromotrice de la génératrice est E, c'est dire que chaque coulomb qui passe de b en a reçoit une énergie de E joules ; par suite, puisque la masse électrique mise en mouvement dans le circuit est de i coulombs par seconde, elle reçoit du moteur qui actionne la génératrice D une énergie de Ei joules par seconde. En d'autres termes, la puissance du moteur est théoriquement $P = Ei$ watts ; elle est, en réalité, un peu plus grande, en raison des frottements. — De même, chaque coulomb, pour traverser D' de b' en a', devrait recevoir E' joules ; donc, inversement, dans le cas actuel, chaque coulomb qui circule dans le sens a'b' communique à la réceptrice une énergie de E' joules ; par suite, les i coulombs qui parcourent le circuit, dans chaque seconde, communiquent à la réceptrice une énergie de E'i joules. C'est l'expression de la quantité de travail utilisée, en une seconde, pour soulever la masse M ; on peut dire que la puissance mécanique utilisable au point d'arrivée est $P' = E'i$ watts. — Le rendement, c'est-à-dire le rapport de P' à P, est donc représenté par l'expression

$$\rho = \frac{E'}{E}$$

Remarque. — Cette expression montre bien que le rendement est toujours inférieur à l'unité, comme cela doit être. — En effet, le rendement ρ ne saurait tendre vers l'unité, que si la différence $E - E'$ tendait vers zéro ; mais alors l'intensité i du courant, représentée par $\frac{E - E'}{R}$, tendrait elle-même vers zéro ; par suite, la puissance dépensée $P = Ei$, et la puissance transportée $P' = E'i$, deviendraient nulles.

899. Cas particulier de deux machines magnéto-électriques identiques. — Considérons le cas particulier où la génératrice et la réceptrice sont deux machines magnéto-électriques, constituées par des induits identiques, tournant dans des champs magnétiques d'égale intensité. — Les forces électromotrices E et E', indépendantes de l'intensité du courant, sont respectivement proportionnelles aux nombres de tours n et n' effectués en une seconde par les induits de la génératrice et de la réceptrice.

On peut se proposer le problème suivant : La génératrice étant animée d'une vitesse déterminée, quelle doit être la vitesse de la réceptrice, pour que la puissance mécanique transportée P' soit maximum ?

La puissance P', qu'il s'agit de rendre maximum, a pour expression $P' = E'i$, ou $P' = \frac{E'(E - E')}{R}$, en remplaçant i par sa valeur $\frac{E - E'}{R}$. Le dénominateur étant constant, P' sera maximum quand le produit des deux facteurs E' et $E - E'$ sera maximum ; or la somme E de ces deux facteurs est ici constante, puisqu'on suppose que la génératrice fait un nombre déterminé n de tours par seconde. Dès lors, la puissance transportée P' sera maxi-

(*) Pour les machines industrielles, telles que la machine de Gramme, où, dans chaque hélice, la force électromotrice varie pendant la durée de la révolution, la self-induction a pour effet de faire croître la résistance ; on doit alors remplacer R par la résistance apparente R' (note de la page 754).