

l'induit aura donc été parcouru par deux courants de sens contraire. Il en sera de même pour les révolutions suivantes et, par suite, il y aura production de courants alternatifs dans l'induit et dans le circuit auquel il est relié.

Le résultat est le même si l'induction est produite par une variation de champ magnétique due à un courant; car l'intensité de celui-ci ne peut pas toujours croître ou toujours décroître, il y a alternativement des périodes de croissance et de décroissance. Le courant qui parcourt l'induit est donc alternatif.

959. **Effets des courants d'induction.** — Quels sont les effets qui peuvent résulter de l'existence de ces courants alternatifs?

En ce qui concerne les actions calorifiques, ils doivent se comporter comme des courants continus, car nous avons dit que ces effets sont indépendants du sens du courant (890); c'est, en effet, ce que montre l'expérience.

Il n'en est pas de même pour les effets chimiques qui sont orientés : les courants alternatifs peuvent bien produire l'électrolyse, il est vrai, comme les courants continus; mais, dans ce cas, le courant changeant de sens à chaque instant, chaque électrode est successivement l'anode et la cathode. Aussi si, par exemple, on décompose l'eau acidulée (901), on recueille dans les deux éprouvettes de voltamètre un mélange d'hydrogène et d'oxygène.

Quant aux actions sur les aimants et sur les courants, les courants alternatifs, s'ils se succèdent assez rapidement, comme c'est le cas en général, sont sans action, car ils tendent à communiquer à l'aiguille aimantée ou à l'équipage mobile des mouvements de sens contraire à des instants très rapprochés.

960. — On peut, dans certains cas, recueillir dans le circuit extérieur les courants parcourant l'induit en les redressant, de manière qu'ils aient tous le même sens. On pourra alors avoir des phénomènes chimiques identiques ou analogues à ceux que donnent les courants continus. Il

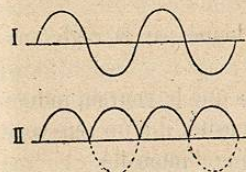


Fig. 464.

faut remarquer cependant que, tandis que ceux-ci ont une intensité constante, les courants redressés sont constamment variables passant très rapidement d'une intensité nulle au maximum pour revenir à zéro. On se rend aisément compte de ce résultat en représentant graphiquement l'intensité du courant aux divers instants par l'ordonnée d'une courbe dont les abscisses sont les temps (fig. 464). Le tracé I représente les variations normales du courant induit; le trait plein du tracé II fait connaître les variations d'intensité du courant quand il y a eu redressement : on distingue alors nettement le résultat que nous avons signalé et qu'il est utile de connaître au point de vue de la physiologie.

961. **Self-induction. Extra-courant.** — Lorsqu'un courant commence à circuler dans une bobine formée de fils enroulés en hélice, le courant qui pénètre dans une spire produit un effet d'induction dans les spires voisines où il fait naître une FEM contraire à celle qui produit le courant même. Il y a donc induction du courant sur son propre circuit, ou *self-induction*, suivant l'expression consacrée maintenant. Il en résulte nécessairement que, pendant l'établissement du courant, l'intensité est moindre qu'elle ne serait sans cette action.

Lorsqu'on interrompt le courant dans une bobine, il y a de même *self-induction*, mais, dans ce cas, la cessation du courant dans une spire fait naître dans les spires voisines une FEM du même sens que celle qui produisait le courant même; aussi, à cet instant, doit-il y avoir augmentation de l'intensité du courant. L'action est la même que si au courant principal on ajoutait à l'instant de la clôture un courant additionnel qu'on appelle *extra-courant de clôture*.

Indépendamment des démonstrations rigoureuses qu'on peut donner de l'existence de ces effets, on peut mettre en évidence l'extra-courant de clôture ainsi qu'il suit : un long fil est attaché à une pile et on y produit une rupture; il se manifeste une étincelle faible en général. On enroule alors le fil sur une bobine et, le courant ayant été établi, on produit une rupture : on obtient une étincelle beaucoup plus considérable. L'effet est, d'ailleurs, augmenté par toutes les conditions qui favorisent l'induction : c'est ainsi que l'étincelle est encore beaucoup plus forte si l'on a introduit un faisceau de fils de fer doux dans la bobine.

962. — Des effets d'induction se manifestent non seulement dans des circuits, mais encore dans toute masse métallique qui se déplace dans un champ magnétique. C'est ainsi qu'il se produit des courants dans un disque de cuivre qu'on fait tourner au-dessus des pôles d'un aimant ou inversement au-dessous duquel on fait tourner un aimant. Nous n'indiquerons pas les moyens qui ont été employés pour étudier ces courants désignés sous le nom de courants de Foucault, et nous dirons seulement que leur existence explique les faits suivants que l'expérience a fait connaître :

Si un disque de cuivre est mis en rotation au-dessus des pôles d'un aimant, puis abandonné, il s'arrête très rapidement, beaucoup plus rapidement que si l'aimant n'existait pas.

Si on fait tourner un aimant au-dessous d'un disque de cuivre mobile, celui-ci est entraîné, alors même qu'on a interposé une feuille de papier pour que l'action de l'air en mouvement ne puisse intervenir.

Ces deux effets résultent, l'un et l'autre, de la production de courants induits dont le sens, d'après la loi de Lenz, doit être tel qu'ils s'opposent au mouvement relatif et tendent à produire le repos relatif, c'est-à-dire à ramener le disque au repos dans le premier cas, à lui donner la même vitesse qu'à l'aimant dans le second cas.

963. **Machines d'induction.** — Les appareils destinés à produire des courants d'induction portent le nom de machines d'induction, quand ils fonctionnent par déplacement du champ magnétique, et de bobines d'induction quand ils fonctionnent par variation d'intensité du champ magnétique; nous nous occuperons d'abord des machines.

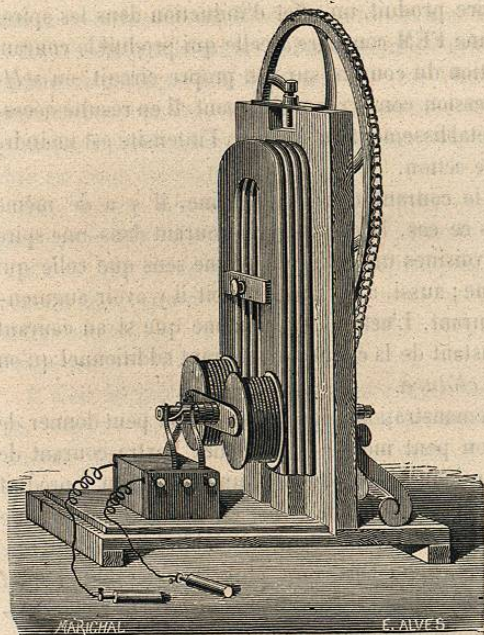


Fig. 465.

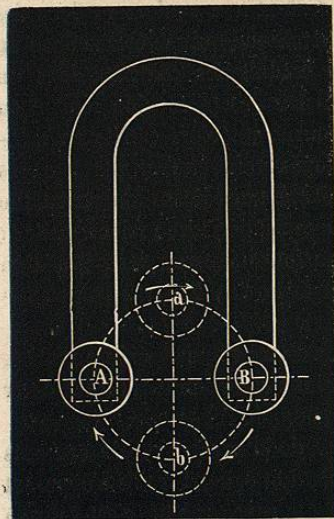


Fig. 466.

on peut, à volonté, les grouper en série ou parallèlement. Ajoutons

La machine de Clarke (fig. 465) est le type des machines dans lesquelles les induits se déplacent dans un champ magnétique invariable. Les inducteurs sont constitués par un aimant en U placé verticalement devant les pôles duquel tournent autour d'un même axe deux bobines. En suivant les

effets de l'induction sur chaque bobine pendant une révolution complète (fig. 466), on reconnaît aisément que le sens du courant doit changer dans chacune d'elles, au moment où elle passe devant un pôle, car c'est en ce point que les lignes de force sont le plus rapprochées : la ligne qui passe par les pôles a reçu pour cette raison le nom de *ligne de commutation*. On reconnaît également que, à chaque instant, les courants produits par l'induction ont des sens contraires dans les deux bobines. Ces deux bobines se comportent comme des électromoteurs dans lesquels les pôles changeraient de position lorsqu'ils passent à la ligne de commutation :

que, dans ce cas, la FEM est variable dans chaque bobine pendant chaque demi-révolution partant de zéro pour y revenir tandis qu'elle est constante dans les électro-moteurs précédemment étudiés.

Les bobines dans lesquelles se produisent les courants étant mobiles, il faut employer une disposition spéciale pour relier les extrémités de leurs fils aux extrémités fixes du circuit extérieur. A cet effet, on emploie un *collecteur* disposé de la façon suivante (fig. 467) :

Les extrémités des fils des bobines aboutissent en *a* et *b* à un cylindre isolant qui tourne avec les bobines mêmes : le fil *a* est relié à une pièce métallique *xy* qui traverse le cylindre et communique métalliquement avec un anneau métallique *m* qui entoure le cylindre et contre lequel appuie un ressort *A* faisant frottoir ; le fil *b* d'autre part communique directement avec un second anneau métallique *n* distant du premier et sur lequel s'appuie un autre ressort *B'*. On réunit les extrémités *C* et *D* des fils constituant le circuit extérieur aux bornes *A* et *B*; ce circuit sera donc en communication constante avec les bobines et le même courant les parcourra à chaque instant. Il y aura donc un courant alternatif dans le circuit extérieur.

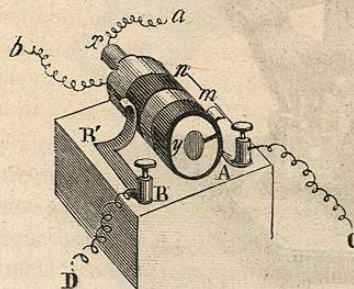


Fig. 467.

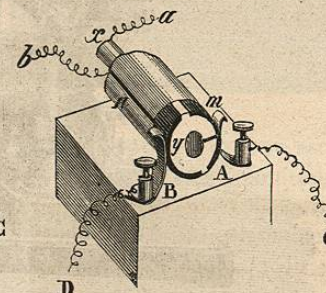


Fig. 468.

On peut obtenir des courants redressés en remplaçant le collecteur par un *commutateur*. Les extrémités *a* et *b* (fig. 468) des fils des bobines aboutissent de même au cylindre isolant et sont reliées respectivement à deux demi-anneaux placés à la suite, mais séparés par un intervalle, de manière qu'ils ne communiquent pas, et sur lesquels frottent de part et d'autre le ressort *A* et le ressort *B*. La place de la séparation des deux demi-anneaux a été choisie de telle sorte qu'elle arrive en contact avec les frottoirs à l'instant où les bobines arrivent à la ligne de commutation. Les extrémités *C* et *D* du circuit extérieur seront donc en communication alternativement avec les fils *a* et *b* des bobines; mais comme le changement de contact se produit à l'instant où le sens du courant change dans les bobines, le circuit extérieur sera parcouru par l'électricité toujours dans le même sens.

La machine de Pixii repose sur le même principe, seulement les

bobines sont fixes et les aimants sont mobiles : il en résulte quelques modifications sans importance.

964. — Une ingénieuse disposition, trouvée par Pacinotti d'abord, puis inventée à nouveau et développée par Gramme, a introduit un changement considérable dans les résultats fournis par les machines d'induction, en permettant à celles-ci de produire non seulement des courants alternatifs et des courants redressés, mais encore des courants sensiblement continus.

La machine Gramme (fig. 469) comprend essentiellement un aimant

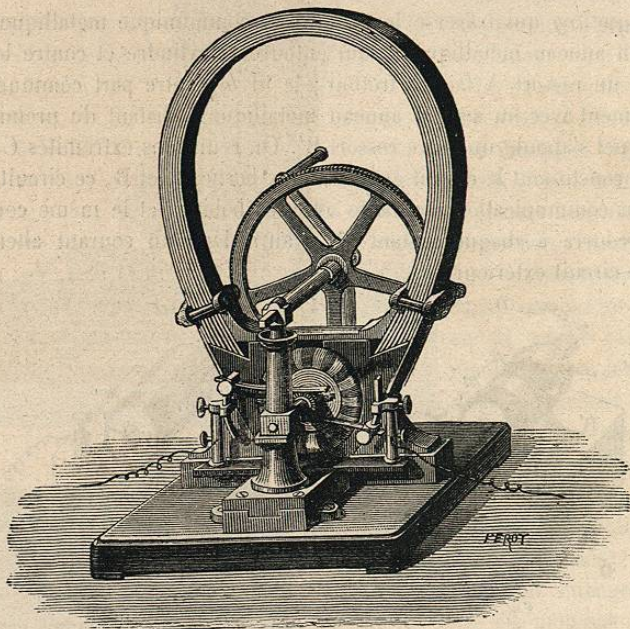


Fig. 469.

en U dont les pôles sont prolongés par des masses de fer doux qui laissent entre elles un espace circulaire dans lequel tourne un anneau. Cet anneau est constitué par un noyau annulaire en fil de fer doux sur lequel est enroulé un fil isolé constituant autant de bobines distinctes, H, I, K (fig. 470); en réalité, ces bobines ne sont pas séparées par un large intervalle comme l'indique le schéma, mais sont en contact. On voit que ces bobines se meuvent dans un champ magnétique complexe dû à l'existence simultanée de l'aimant, de ses pièces polaires et du fer doux de l'anneau. Une étude détaillée montre que, comme dans la machine de Clarke, il y a une ligne de commutation, mais qu'elle est verticale, de telle sorte que toutes les bobines qui sont d'un même côté de cette ligne sont parcourues par des courants de même sens, sont le

siège de FEM semblablement orientées, tandis que les bobines situées de l'autre côté sont le siège de FEM orientées en sens contraire.

On voit que si toutes les bobines sont reliées à la suite, comme H et I, par l'intermédiaire des fils h' et i , l'ensemble des bobines constitue deux séries d'électromoteurs deux à deux égaux, parce qu'ils occupent des positions symétriques, ces deux séries étant montées en opposition. Nous avons traité ce cas, d'une manière générale (872), et nous savons qu'il

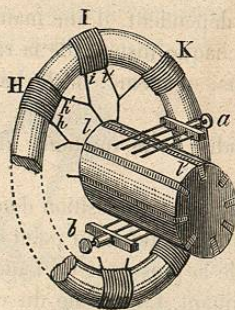


Fig. 470.

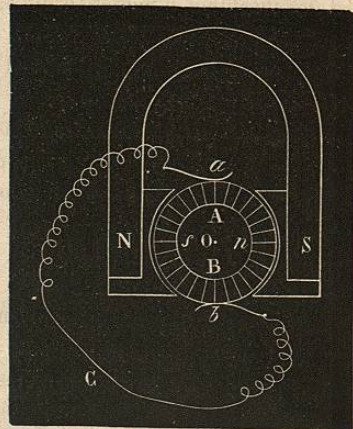


Fig. 471.

n'y a pas production de courant si l'anneau est seul; mais il en est tout autrement si on établit une dérivation entre les points où se réunissent les deux séries opposées. Dans la machine Gramme, ces points sont situés à chaque instant sur la verticale du centre de l'anneau (fig. 471). Si donc on établit en ces points des frottoirs a et b , le fil C qui les réunit est traversé par un courant qui est toujours de même sens et qui a toujours la même intensité, parce que, à tous les instants, il y a le même nombre de bobines élémentaires d'un même côté de la ligne de commutation.

En réalité ce n'est pas sur l'anneau que l'on établit les contacts, mais sur un collecteur spécial : ce collecteur est constitué par un cylindre isolant qui tourne avec l'anneau; dans ce cylindre sont enchâssées, parallèlement aux génératrices, des lames de cuivre l, l' (fig. 470) en nombre égal à celui des bobines; chaque lame est reliée avec les deux extrémités des fils des bobines voisines telles que h' et i . Deux balais constitués par des fils métalliques reliés à des bornes a et b appuient sur la surface du cylindre en deux points diamétralement opposés. Si ces points ont été choisis tels qu'ils correspondent à la position où les bobines passent à la ligne de commutation, on aura réalisé les conditions indiquées par la théorie, et le fil qui reliera les bornes a et b sera parcouru par un courant continu sensiblement constant. Ajoutons que, dans la pratique, la ligne de commutation n'est pas absolument verticale, les balais ne doi

vent donc pas prendre le contact sur les génératrices inférieure et supérieure, mais sur d'autres situées à quelque distance; on dit alors qu'il y a *décalage* des balais.

965. **Machines d'induction médicales.** — Au point de vue des applications physiologiques et médicales, la machine Gramme peut être utilisée comme une pile quelconque, et la substitution de l'une à l'autre est seulement une question de commodité ou de dépense. Il n'en est pas ainsi des machines d'induction qui agissent par les variations de courant, les interruptions, les changements de sens : aussi sont-elles fréquemment utilisées et le mode d'emploi des courants d'induction a reçu le nom d'*électrisation faradique*.

La grandeur et la nature des effets obtenus dépendent, d'une manière générale, de l'intensité du courant produit à chaque instant, de la rapidité des interruptions ou changement de sens, et même, de la loi de variation de l'intensité.

Le nombre des variations dépend de la rapidité de la rotation : il est inutile d'insister.

La valeur de l'intensité du courant produite pour une position donnée de la bobine dépend de la puissance du champ magnétique au point considéré, et cette puissance elle-même dépend de la puissance de l'aimant inducteur et de la distance de la bobine à l'aimant. L'intensité du courant dépend également de la longueur et du diamètre du fil qui constitue l'induit, et aussi, enfin, de la vitesse relative à l'instant considéré.

Pour un appareil donné, on ne peut produire des variations d'intensité que de deux manières, par un changement dans la vitesse de rotation, par un changement de distance. Le changement de rotation peut être utilisé, les effets étant plus faibles quand la vitesse est moindre, et inversement, mais en même temps on change nécessairement la fréquence des variations électriques, alors qu'il peut être utile de ne changer que l'intensité. On voit donc que, en général, on ne peut agir d'une manière commode sur l'intensité des courants d'induction que par le changement de distance des pôles de l'aimant aux bobines. Aussi les machines d'induction destinées à des emplois médicaux présentent-elles presque toujours un moyen de réglage de cette distance.

Il est inutile de décrire en détail toutes les machines qui ont été construites : les unes se rapprochent de la machine de Clarke; les autres de la machine de Pixii, et l'on y retrouve les mêmes organes avec seulement des changements sans importance réelle.

966. — M. d'Arsonval a étudié les effets physiologiques produits par les courants induits, les secousses, les contractions notamment, principalement au point de vue de la loi du courant; en représentant, comme nous l'avons dit (960), la loi du courant par une courbe, il a reconnu que les actions étaient d'autant moindres que la courbe était plus régu-

lière, qu'elle se rapprochait davantage d'une sinusoïde, courbe analogue à celle indiquée (fig. 464). Les machines ordinaires ne donnent pas des courants de cette forme; mais M. d'Arsonval est parvenu à les obtenir en faisant tourner autour d'un axe perpendiculaire à son plan un aimant circulaire devant deux bobines : c'est donc une machine analogue à celle de Pixii, mais dans laquelle les actions exercées par l'aimant varient moins brusquement, puisqu'elles s'exercent non seulement par l'action des pôles, mais par celle de tout l'aimant sur lequel se répartit le magnétisme.

967. — Occupons-nous maintenant des appareils dans lesquels l'induction est produite par une variation du champ magnétique et examinons d'abord le cas où cette variation est réalisée par l'action d'un fer doux. Cette circonstance se présente dans la machine de Page : dans cette machine, les pôles d'un aimant en U sont entourés de bobines

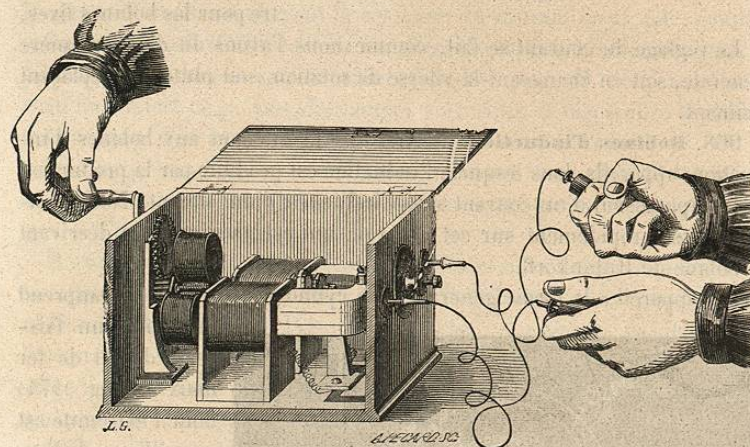


Fig. 472.

dont les fils sont reliés au circuit extérieur. Devant les pôles de l'aimant tourne un barreau de fer doux : en présence des pôles, il s'aimante par influence et produit une variation du champ magnétique qui change avec les diverses positions du fer doux : il résulte de ces variations des courants qui parcourent les bobines et le circuit extérieur.

Le fer doux étant symétrique, sans polarité, l'effet qu'il peut produire, production de deux courants de sens contraire, est complet en une demi-révolution, de telle sorte que, pour une révolution complète du barreau de fer doux, il y a quatre changements de sens du courant.

La machine d'induction médicale de Breton (fig. 472) réunit les principes de la machine de Clarke et de la machine de Page. Deux bobines mues par une manivelle tournent devant les pôles d'un aimant, d'une part; d'autre part, deux bobines entourent les pôles de l'aimant. La rotation dans le champ magnétique fait naître des courants dans les deux

premières bobines; la variation du champ magnétique par la rotation des noyaux de fer doux des bobines mobiles fait naître des courants dans les

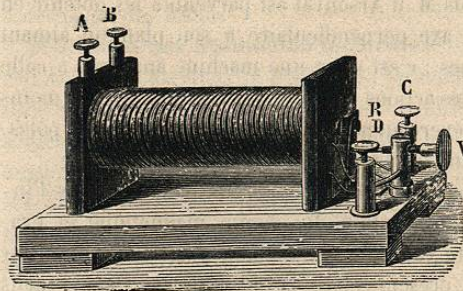


Fig. 473.

bobines fixes. On réunit ces courants pour les faire passer dans le circuit extérieur, mais il faut employer un commutateur spécial parce que, comme nous l'avons dit, pour un tour complet, il y a deux changements de sens du courant produit dans les bobines mobiles, il y en a quatre pour les bobines fixes.

Le réglage du courant se fait, comme nous l'avons dit d'une manière générale, soit en changeant la vitesse de rotation, soit plutôt en déplaçant l'aimant.

968. **Bobines d'induction.** — Arrivons maintenant aux bobines d'induction, appareils dans lesquels l'induction est produite par la production et la suppression d'un courant sous l'influence d'un aimant. Nous pouvons passer rapidement sur cet appareil, qui est classique, en décrivant la bobine de Ruhmkorff.

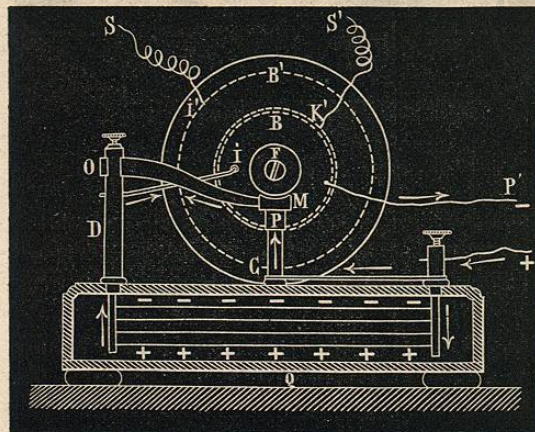


Fig. 474.

Cet appareil a la forme générale d'un cylindre (fig. 473); il comprend au centre un faisceau de fil de fer doux F (fig. 474) dont l'extrémité est en saillie sur la base du cylindre; autour se trouve enroulé en hélice sur plusieurs couches, en B, un fil de cuivre recouvert d'une matière isolante; c'est le fil inducteur qui d'une part aboutit à la pile en P, et d'autre part est relié à la pièce métallique D, comme nous allons le dire. Autour de cette première bobine s'en trouve une autre B', bobine induite, constituée par un fil isolé, fin et long, dont les extrémités S et S' peuvent être reliées au circuit extérieur.

La bobine comprend en outre un interrupteur par l'intermédiaire duquel elle est reliée à la pile et qui produit les cessations et rétablissements de courant nécessaires au fonctionnement de l'appareil.

A cet effet, une pièce OM dont l'extrémité M est en fer doux peut osciller entre le fer doux F et un contact p ; cette pièce est attirée par le fer doux quand celui-ci est aimanté, elle s'applique contre le contact quand le fer doux cesse d'être aimanté. Dans le cas de la figure, ce mouvement de retour s'effectue sous l'influence de la pesanteur, mais, en réalité, maintenant il est toujours produit par l'action d'un ressort. Le contact p est relié à une borne à laquelle communique le pôle + de la pile.

On voit qu'on retrouve dans cet appareil la disposition du trembleur de la sonnerie électrique (919) : l'effet sera donc nécessairement le même, et la pièce M oscillera automatiquement entre le fer doux F et le contact p . De ces oscillations résulteront la cessation du courant de la pile, courant inducteur, quand M attiré par le fer doux abandonnera le contact, puis le rétablissement du courant inducteur quand la pièce M viendra de nouveau au contact de p . Ces alternatives font naître et disparaître le champ magnétique, d'où la production de courant dans le fil induit.

Ajoutons, sans insister actuellement, qu'il est bon que le fil inducteur soit relié aux deux armatures d'un condensateur par deux points pris de part et d'autre de l'interrupteur.

Il existe des machines d'induction de dimensions très variables suivant les effets que l'on veut obtenir; lorsque la bobine est très grande, il est nécessaire de remplacer l'interrupteur que nous venons de décrire par l'interrupteur de Foucault qui fonctionne d'une manière analogue, mais exige l'emploi d'une pile spéciale. Nous n'insisterons pas, car ces grands appareils ne sont employés ni en médecine, ni en physiologie.

969. — Le nombre des interruptions, pour une bobine donnée, peut varier par un réglage du ressort antagoniste, mais les variations sont nécessairement comprises entre des limites peu étendues. Il peut être utile en physiologie de produire des courants induits en nombre déterminé, variable à volonté : on y arrive, par exemple, par l'emploi d'interrupteurs dont la pièce mobile peut changer de longueur ou être surchargée d'un poids dont on fait varier la position. Dans un appareil de GaiFFE, un changement d'inclinaison d'une tige oscillante SI (fig. 475) produit un effet analogue. Enfin on peut supprimer l'interrupteur et le remplacer par un électro-diapason dont les dimensions ont été choisies en relation avec la fréquence des effets que l'on veut obtenir.

M. Trouvé, pour satisfaire à cette condition d'avoir des interruptions de fréquence déterminée et variable à volonté, a construit un appareil basé sur un tout autre principe. Il comprend un cylindre métallique E (fig. 476) mis en mouvement par un rouage d'horlogerie. Le cylindre communique constamment avec un pôle de la pile alors que l'autre pôle

est relié à une pièce métallique HF dont l'extrémité libre est à quelque distance du cylindre qu'elle ne touche pas; cette pièce peut d'ailleurs se déplacer parallèlement à l'axe du cylindre.

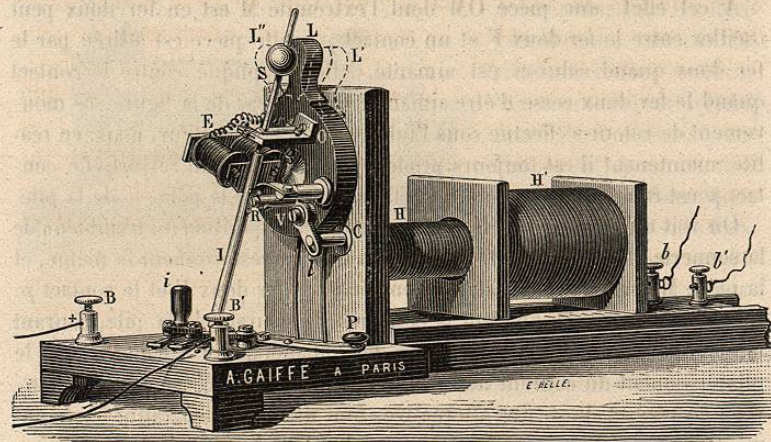


Fig. 475.

Le cylindre est armé de pointes métalliques qui sont disposées sur des sections droites parallèles, de telle sorte que sur chacune de ces circon-

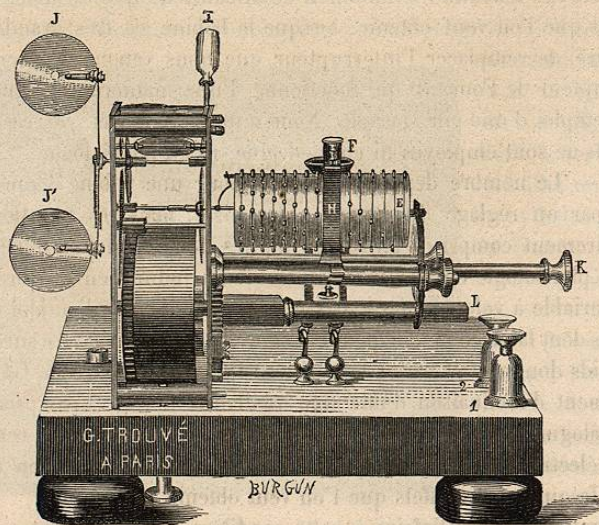


Fig. 476.

férences elles soient également espacées, mais que leur écart ne soit pas les mêmes sur les diverses circonférences. On comprend que, lorsque par la rotation du cylindre une des pointes du cylindre rencontre la

pièce F, le courant passe pendant un temps très court, puis cesse pour passer de nouveau au contact suivant. Suivant la position occupée par la pièce F, le passage du courant s'établira plus ou moins fréquemment; mais, dans tous les cas, et quelle que soit sa fréquence, il aura la même durée, ce qui est une condition importante au point de vue des recherches physiologiques.

970. — Toutes choses égales d'ailleurs, la FEM d'induction produite dans une bobine induite dépend de la longueur et du diamètre du fil qui constitue cette bobine. Aussi, lorsqu'il est possible, convient-il d'avoir des bobines à fil gros et d'autres à fil fin.

Quels sont les éléments dont dépendent les variations d'intensité du courant induit pour une bobine donnée?

L'intensité du courant induit est proportionnelle à celle du courant inducteur; on pourra donc faire varier le premier à volonté en modifiant le second par les moyens connus, soit en changeant la FEM, ce qui exige une modification dans la pile produisant le courant, soit en introduisant dans le circuit inducteur une résistance variable à volonté: cette disposition est plus commode parce qu'elle permet de ne pas interrompre l'action et d'obtenir des effets variant par degrés insensibles.

L'action inductrice dépend aussi de la distance qui sépare la bobine induite de la bobine inductrice. Dans la plupart des appareils, les bobines sont invariablement fixées et on ne peut faire varier cette distance: mais il en est autrement dans la bobine à chariot de Dubois-Raymond (fig. 475 et 477) dans laquelle la bobine induite H' est montée à part sur

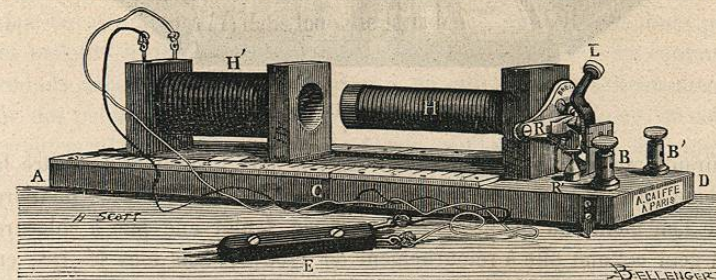


Fig. 477.

un support qui permet de la déplacer, soit qu'elle recouvre complètement la bobine inductrice, soit qu'elle la recouvre seulement en partie, soit même qu'elle en soit complètement séparée. Une échelle graduée permet de déterminer la position exacte de cette bobine mobile, afin de pouvoir reproduire à volonté des conditions bien définies.

Enfin, on peut faire varier l'intensité du courant induit en faisant naître une action qui produise un effet inverse de celui du courant inducteur. On réalise cette condition, en plaçant entre le fer doux et la