

CHAPITRE VII

COURANTS D'INDUCTION

I. — PHÉNOMÈNES FONDAMENTAUX.

599. **Courants d'induction.** — On a vu comment, dans les piles *hydro-électriques*, telles que la pile de Volta et celles qui en dérivent, l'énergie correspondante aux divers effets produits par le courant est empruntée à la chaleur dégagée par les réactions chimiques qui s'accomplissent dans la pile elle-même (515). — On a vu également comment, dans les piles *thermo-électriques*, l'énergie correspondante à ces mêmes effets est empruntée à la chaleur que l'on fournit directement aux points de soudure des métaux qui composent la pile (524).

On appelle *courants d'induction*, des courants qui prennent naissance dans un circuit conducteur placé, soit au voisinage d'un autre circuit parcouru par un courant, soit au voisinage d'un aimant, lorsqu'on imprime, aux uns ou aux autres, des déplacements modifiant leurs distances relatives. — L'énergie correspondante à l'accomplissement des divers effets produits par ces courants d'induction est empruntée au travail que l'on doit dépenser pour effectuer les déplacements eux-mêmes. — Ces courants ont été découverts par Faraday, en 1815.

Nous allons d'abord constater, par l'expérience, les phénomènes fondamentaux de l'induction. — Nous diviserons cette étude en trois parties : 1° induction produite par un courant; 2° induction produite par un aimant; 3° induction produite par la terre.

600. **Induction produite par un courant, ou induction volta-électrique.** — Soit deux bobines A et B (fig. 496), composées chacune d'un fil de cuivre couvert de soie, enroulé sur un cylindre de bois creux; pour chacune d'elles, les deux extrémités du fil se terminent par des bornes métalliques. En adaptant des fils conducteurs à ces bornes, nous pourrions placer l'une des bobines, A, dans le circuit d'une

pile V; l'autre bobine, B, dans un autre circuit contenant seulement un galvanomètre G. — Cette disposition permettra d'effectuer les trois expériences suivantes :

1° Avant de fermer le circuit de la pile V et de la bobine A, mettons la bobine A dans la bobine B. Au moment où nous fermerons le circuit VA, nous constaterons qu'il se développe, dans le circuit voisin BG, un courant accusé par une déviation de l'aiguille du galvanomètre. Le courant VA prend le nom de courant *inducteur*; le courant BG, le nom de courant *induit*. Le sens dans lequel se produit la déviation de l'aiguille montre que le courant induit est *de sens contraire au courant inducteur*. — Mais le courant induit n'a qu'une durée extrêmement courte :

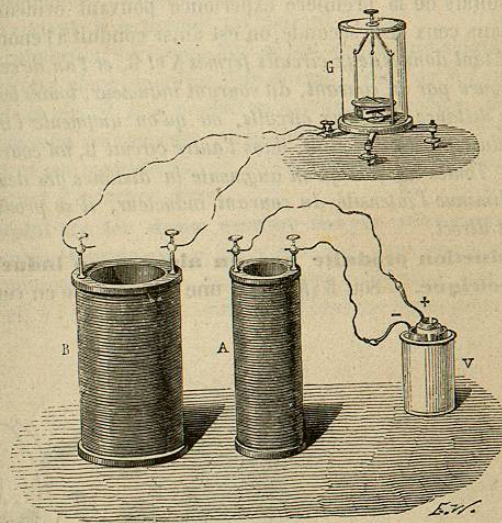


Fig. 496. — Induction produite par un courant.

car l'aiguille, qui avait été brusquement écartée du zéro de la graduation, revient immédiatement sur elle-même; elle oscille régulièrement de part et d'autre du zéro, et finit par s'arrêter dans cette position, qu'elle conserve tant que le circuit inducteur reste fermé.

Si maintenant, une fois l'aiguille revenue au zéro, on vient à rompre le circuit de la pile, on observe une nouvelle déviation de l'aiguille, en sens opposé de la première. Donc, au moment de la rupture du courant inducteur, il se développe encore un courant induit, mais ce courant est *de même sens que le courant inducteur*.

Nous appellerons *courant induit inverse*, celui qui se produit en sens inverse du courant inducteur; *courant induit direct*, celui qui se produit dans le même sens que le courant inducteur.

2° Les deux bobines étant séparées (fig. 496), et le circuit VA étant maintenu fermé, si l'on vient à introduire brusquement la bobine A dans la bobine B, l'aiguille du galvanomètre accuse un courant induit *inverse*. — Une fois l'aiguille revenue au zéro, si l'on éloigne brusquement la bobine B, on constate un courant induit *direct*.

3° Enfin, supposons la bobine A placée dans la bobine B, et le circuit VA fermé : l'aiguille du galvanomètre étant au zéro, si l'on vient à augmenter l'intensité du courant inducteur, par exemple en diminuant la résistance sans interrompre le circuit, on observe un courant induit *inverse*. — Si l'on diminue l'intensité du courant inducteur, on observe un courant induit *direct*.

Les résultats de la première expérience pouvant évidemment être compris dans ceux de la seconde, on est ainsi conduit à l'énoncé général suivant : *Étant donnés deux circuits fermés A et B, et l'un de ces circuits A étant parcouru par un courant, dit courant inducteur, toutes les fois qu'on diminue la distance des deux circuits, ou qu'on augmente l'intensité du courant inducteur, il se produit, dans l'autre circuit B, un courant induit inverse. — Toutes les fois qu'on augmente la distance des deux circuits, ou qu'on diminue l'intensité du courant inducteur, il se produit un courant induit direct.*

601. **Induction produite par un aimant, ou induction magnéto-électrique.** — Soit B (fig. 497) une bobine mise en communica-

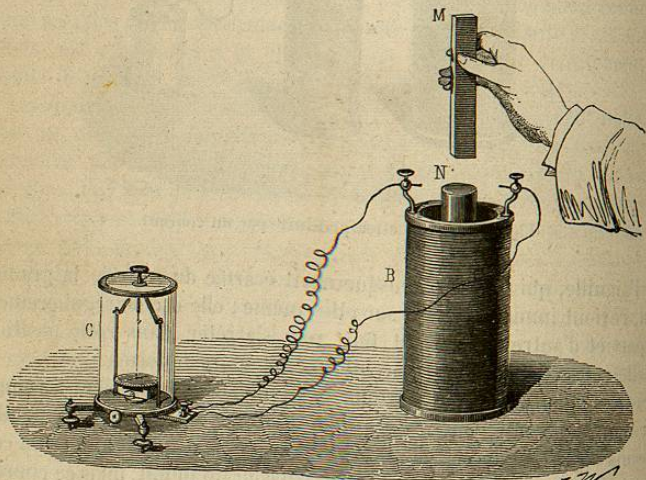


Fig. 497. — Induction produite par un aimant.

tion avec un galvanomètre G. Dans cette bobine, on place un barreau de fer doux N, et l'on approche *vivement* de son extrémité supérieure

l'un des pôles d'un aimant M. A ce moment, le barreau N s'aimantant par l'influence, l'aiguille du galvanomètre reçoit une impulsion : quant au sens du courant induit qui produit cette déviation, on peut constater qu'il est *inverse* du sens dans lequel circulent les courants particuliers (579), orientés par l'aimantation dans le fer doux N. Mais, ici encore, l'aiguille du galvanomètre revient aussitôt vers sa position primitive ; lorsqu'elle a repris cette position, elle la conserve tant que le fer doux reste aimanté. — Si l'on retire l'aimant M, le magnétisme du fer doux N disparaît, et l'aiguille accuse un courant induit *direct*, c'est-à-dire de même sens que les courants particuliers.

De même, si, après avoir enlevé de la bobine le barreau N, on y introduit brusquement l'aimant, il se produit un courant *inverse*. — Si l'on retire l'aimant, il se produit un courant *direct*.

De là, la conclusion suivante : *Si l'on fait naître l'aimantation dans un corps magnétique placé au milieu d'un circuit fermé, ou si l'on approche un aimant de ce circuit, il se produit un courant d'induction, dont le sens est inverse de celui des courants particuliers de l'aimant. — Si l'aimant inducteur perd son magnétisme, ou si l'on éloigne cet aimant, il se produit un courant d'induction direct.*

602. **Emploi du fer doux comme moyen d'augmenter l'induction volta-électrique.** — Supposons que, dans une bobine B dont le fil communique avec un galvanomètre, on place une bobine A (fig. 498), et, à l'intérieur de celle-ci, un barreau de fer doux D : à l'in-

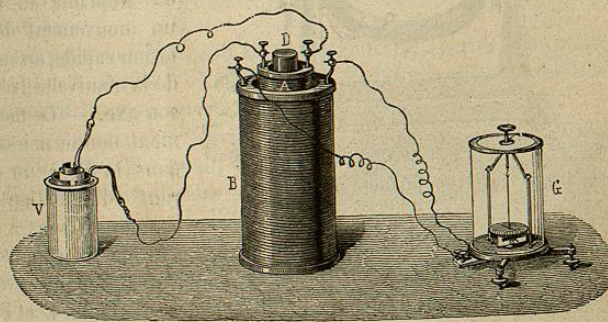


Fig. 498. — Emploi du fer doux, pour augmenter l'induction volta-électrique.

stant où l'on établit la communication entre la bobine A et la pile V, il se produit dans le fil A un courant d'induction volta-électrique, qui est inverse du courant inducteur (600, 1°). Mais, en même temps, le fer doux s'aimante, comme le noyau d'un électro-aimant, et ses courants particuliers sont de même sens que ceux de la bobine A ; ce magnétisme naissant développe, dans le fil B, un courant d'induction

magnéto-électrique, dont le sens est inverse de celui des courants particuliers (601). — Donc, dans le fil B, le courant volta-électrique et le courant magnéto-électrique sont de même sens, et, comme ils se produisent au même instant, leurs intensités s'ajoutent : on constate, en effet, que la déviation de l'aiguille du galvanomètre est beaucoup plus grande.

L'expérience montre qu'un *faisceau de fils* de fer, substitué au barreau D, renforce le courant induit plus énergiquement encore que ne fait un barreau unique de même diamètre.

605. Induction produite par la Terre, ou induction telluro-électrique. — On sait que l'action de la Terre est assimilable, soit à l'action d'un *aimant*, dirigé du nord au sud (481), soit à l'action d'un *courant*, dirigé de l'est à l'ouest (575). — Dès lors, si l'on prend un circuit fermé, et si on lui imprime un déplacement rapide par rapport à la direction de l'aimant terrestre, il doit y avoir, dans ce circuit, production d'un courant induit. — C'est ce qu'on vérifie de la manière suivante.

Un cadre circulaire MN (fig. 499), mobile autour d'un axe horizontal AB, porte un fil conducteur couvert de soie et enroulé un grand nombre

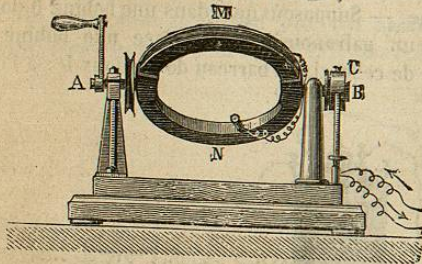


Fig. 499. — Induction produite par la Terre.

de fois sur ce cadre. L'axe AB étant placé perpendiculairement au méridien magnétique, on imprime au cadre un mouvement de rotation rapide, au moyen de la manivelle fixée sur son axe. — Ce mouvement donne naissance, dans le fil, à un courant d'induction qui change de sens à cha-

que demi-révolution. Mais les deux extrémités du fil aboutissent à un *commutateur* C, placé sur l'axe, et sur lequel s'appuient deux ressorts communiquant respectivement avec les deux fils E et F qui aboutissent à un galvanomètre : le commutateur a pour effet de donner aux courants d'induction une direction *constante* dans le galvanomètre ; l'aiguille du galvanomètre est déviée d'une quantité d'autant plus grande que le mouvement de rotation est plus rapide.

604. Loi de Lenz. — **Dépense d'énergie correspondante à la production des courants d'induction.** — On a vu, dans l'étude de l'électro-dynamique et de l'électro-magnétisme, que, lorsqu'on soumet un courant mobile à l'action d'un autre courant ou à l'action d'un aimant, ses diverses parties éprouvent des attractions ou des répulsions,

qui peuvent avoir pour effet de lui imprimer des mouvements de telle ou telle nature, suivant la manière dont il est lui-même assujéti. — Or, tous les phénomènes *d'induction* peuvent être compris dans la loi générale suivante, qui a été énoncée par le physicien russe Lenz :

Étant donné un circuit fermé, si l'on produit un déplacement quelconque de ce circuit par rapport à un courant voisin, ou par rapport à un aimant, le sens du courant induit est tel, que ce courant tende à s'opposer au mouvement produit. — Si l'on se reporte, en effet, aux divers résultats des expériences que nous venons de décrire, il est facile de s'assurer que chacun d'eux satisfait à la loi de Lenz.

Mais la loi de Lenz n'a pas seulement l'avantage de relier entre eux, par un même énoncé, les divers phénomènes d'induction. Elle rend manifeste la nécessité de l'intervention d'une *source d'énergie*, pour la production des courants d'induction eux-mêmes. — Considérons, par exemple, un circuit fermé, que l'on mettra en mouvement de manière à le rapprocher d'un courant voisin, ou d'un aimant. Tant que durera ce rapprochement, il se produira un courant induit, dont le sens sera tel, qu'il tende à s'opposer au rapprochement lui-même : dès lors, le travail nécessaire à l'accomplissement de ce mouvement sera plus grand que si le même circuit avait subi le même déplacement sans éprouver aucune influence électrique ou magnétique. — En d'autres termes, le développement des courants d'induction exige toujours une *dépense d'énergie* : cette énergie est précisément celle qui doit être employée à l'accomplissement des divers effets produits par les courants eux-mêmes.

L'expérience suivante, qui est due à Foucault, permet de mettre en évidence cette dépense d'énergie. — Entre les pièces de fer doux A et B,

qui forment les armatures d'un électro-aimant EE (fig. 500), passe librement un disque de cuivre D, que l'on peut faire tourner autour de son axe, au moyen d'un système de roues dentées, et d'une manivelle qui n'est pas représentée sur la figure. Tant que l'électro-aimant n'est pas aimanté, il suffit d'un effort assez faible pour imprimer au disque un mouvement de rotation très

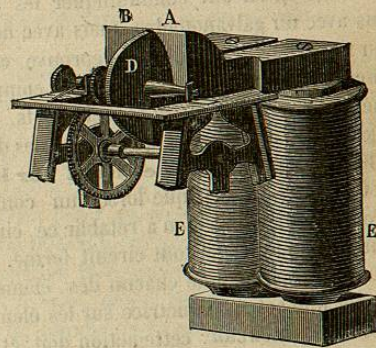


Fig. 500. — Expérience de Foucault.

rapide. — Mais si, au moment où le disque est animé d'une grande vitesse, on vient à faire passer dans le fil de l'électro-aimant le courant

de quelques éléments de Bunsen, on constate que le disque est brusquement arrêté : cet arrêt est dû à la résistance développée par les courants induits, qui se sont produits dans le disque lui-même. — Enfin, si l'on veut alors continuer à faire tourner le disque, on ne parvient à lui imprimer qu'un mouvement de rotation beaucoup plus lent, même avec un effort considérable. Cette dépense d'énergie se traduit ici par un *dégagement de chaleur*, dû aux courants induits qui continuent à circuler dans le disque pendant la rotation. Le dégagement de chaleur est bientôt assez considérable pour produire, dans la masse de cuivre, une élévation de température que l'on peut constater en y appliquant la main. On peut également y appliquer un morceau de cire mélangée de stéarine, qui entre en fusion au contact du métal échauffé (*).

On peut donc dire, en résumé, que la production des courants d'induction constitue un mode de transformation de l'énergie mécanique en électricité. Dans les effets produits par ces courants, se retrouve, soit sous forme de chaleur, soit sous toute autre forme, l'équivalent de l'énergie dépensée.

605. Caractères généraux des courants induits. — Dans toutes les expériences qui précèdent, il faut, pour observer la production des courants induits, imprimer des déplacements rapides aux conducteurs dont les mouvements leur donnent naissance. Les courants induits cessent, à peu près *instantanément*, avec ces déplacements eux-mêmes : c'est ce que montre le retour immédiat de l'aiguille du galvanomètre vers le zéro de la graduation, dans les expériences fondamentales qui ont été décrites (600 à 602).

Dans ces mêmes expériences, la grandeur de l'intensité acquise par les courants induits, même dans des circuits très résistants, peut être constatée en faisant communiquer les extrémités du fil induit, non plus avec un galvanomètre, mais avec deux poignées métalliques, que l'on tient dans les mains. On éprouve, chaque fois qu'il se développe un courant induit, une commotion comparable à celle que donnerait une pile d'un grand nombre d'éléments. — Nous reviendrons sur ce sujet, après avoir décrit quelques-unes des machines d'induction.

606. Induction d'un courant sur lui-même. Extra-courants. — On a vu (600, 1^o) que lorsqu'un courant parcourt un circuit, et qu'on vient à rompre ou à rétablir ce circuit, il y a production d'un courant induit, dans tout circuit fermé, voisin du premier. — Il est naturel de penser que chacun des éléments d'un courant doit aussi exercer une action inductrice sur les éléments voisins qui font partie de son propre circuit : cette action doit être surtout sensible, si le circuit est enroulé sur lui-même, de manière que chacun de ses éléments

(*) On peut encore opérer avec un disque présentant une petite cavité que l'on remplit d'éther et qu'on ferme avec un bouchon. La force élastique de la vapeur d'éther chasse le bouchon avec explosion.

ait dans son voisinage un grand nombre d'autres éléments. C'est la disposition adoptée dans les deux expériences suivantes, qui sont dues à Faraday. — Ces courants d'induction ont reçu le nom d'*extra-courants*.

1^o On fait passer le courant d'une pile PN (fig. 501) dans un long fil métallique, que l'on enroule en une hélice C dans une grande partie de sa longueur : on réunit deux de ses points D, E, situés de part et d'autre de l'hélice, par un fil de dérivation, sur le trajet duquel est interposé un galvanomètre G. Le courant de la pile se partage ainsi entre les deux branches de dérivation, DCE, DGE, qu'il parcourt dans le sens des flèches indiquées sur la figure ; si *mn* est la direction du diamètre passant par le zéro du galvanomètre, on voit le pôle austral de l'aiguille venir, sous l'action du courant, à droite de *mn*, en *a* par exemple. On

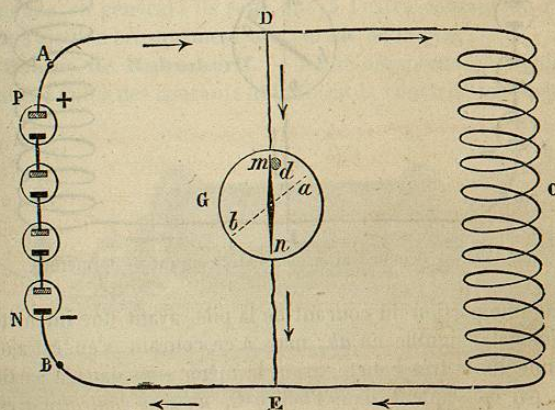


Fig. 501. — Démonstration de l'extra-courant de rupture.

ramène alors, avec la main, l'aiguille dans la direction *am*, et l'on place sur le cadran un petit obstacle *d* à la droite du point *m*, de manière à empêcher l'aiguille de s'écarter de ce côté. — Les choses étant ainsi disposées, si l'on interrompt le courant au voisinage de la pile, en A par exemple, le pôle austral reçoit une vive impulsion à gauche, après laquelle l'aiguille revient au zéro. Donc, *au moment de la rupture* du courant de la pile, le circuit fermé DGECD a été parcouru par un courant, et ce courant avait, dans la portion DGE, un sens contraire à celui du courant de la pile ; par suite, il avait, dans l'hélice C, le même sens que le courant de la pile. — C'est là, comme on l'a vu (600, 1^o), le caractère général du courant induit dû à l'interruption d'un courant inducteur : c'est l'*extra-courant de rupture*.

2^o On détermine, par une expérience préliminaire, la position *ab* (fig. 502) que prend l'aiguille du galvanomètre sous l'action du courant de la pile, et l'on place sur le cadran un petit obstacle *f* à la gauche du

point *a*, de manière à empêcher l'aiguille de revenir au zéro quand on interrompra le courant en A. — Les choses étant ainsi disposées, et le circuit de la pile étant ouvert au point A, on constate que, à l'instant où l'on renferme le circuit en A, le pôle austral de l'aiguille reçoit une vive impulsion à droite, après laquelle il revient en *a*. Donc, au moment de la fermeture du circuit, le fil DGE n'a pas été seulement par-

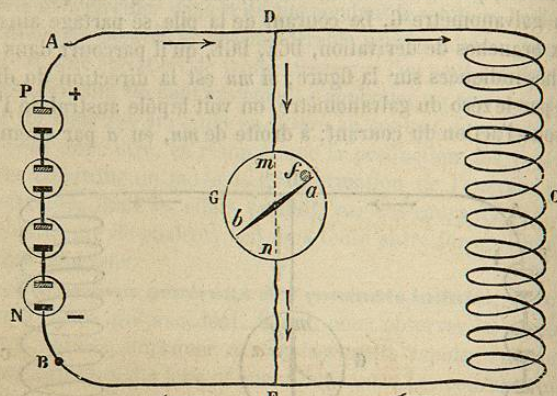


Fig. 502. — Démonstration de l'extra-courant de fermeture.

couru par une portion du courant de la pile, ayant une intensité telle qu'elle amenât l'aiguille en *ab*; mais à ce courant s'en est ajouté un autre, d'une durée très courte, ayant le même sens dans la partie DGE, et ayant, par conséquent, dans l'hélixe C, un sens contraire à celui du courant de la pile. — C'est le caractère général d'un courant induit dû à la fermeture du courant inducteur : c'est l'extra-courant de fermeture.

607. **Conséquences de la superposition des extra-courants et du courant principal.** — L'extra-courant de fermeture, qui se produit au moment où l'on complète le circuit d'une pile, est, comme on vient de le voir, de sens contraire au courant principal. En se superposant au courant principal, il a donc pour effet d'en diminuer l'intensité, dans les premiers instants : par suite, le courant de la pile n'acquiert que graduellement son régime régulier.

Au contraire, l'extra-courant de rupture est de même sens que le courant principal; en se superposant à ce courant, il doit donc en augmenter brusquement l'intensité. — C'est ce que prouvent diverses expériences : il suffira d'en indiquer quelques-unes.

La rupture du circuit d'une pile formée d'une dizaine d'éléments de Bunsen, lorsque le conducteur interpolaire n'est pas replié sur lui-même, donne naissance à une faible étincelle. Au contraire, si l'on interpose dans le circuit une bobine portant un fil enroulé un grand

nombre de fois, l'étincelle de rupture éclate avec un bruit comparable à celui d'une capsule fulminante. Or, la résistance introduite par la bobine ne peut que diminuer l'intensité du courant de la pile, à l'état permanent : l'effet qui se produit ici doit donc être attribué à la superposition d'un extra-courant très intense, au moment de la rupture.

Lorsque le circuit d'une pile contient une bobine, et que, prenant dans les mains les deux extrémités du fil de cette bobine, on les détache vivement de la pile, de manière que l'hélice forme alors avec le corps de l'opérateur un circuit fermé, on ressent une commotion violente. L'intensité de cette commotion est beaucoup augmentée, si l'on introduit dans la bobine un faisceau de fils de fer doux. — On reconnaît immédiatement, dans ces effets, ceux qui caractérisent les courants induits en général : ils sont dus à l'extra-courant de rupture, qui vient s'ajouter brusquement au courant de la pile.

608. **Bobine de Ruhmkorff.** — L'une des premières applications qui aient été faites des courants induits est la construction de la bobine

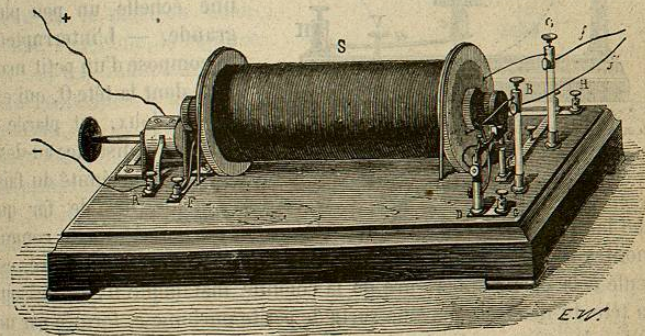


Fig. 505. — Bobine de Ruhmkorff.

de Ruhmkorff, dans laquelle les courants induits sont produits par les alternatives de rupture et de rétablissement d'un courant inducteur, à des intervalles de temps très courts. — La première idée de cet appareil est due à Masson; les détails de construction ont été réalisés par Ruhmkorff.

Sur un cylindre de bois, on a enroulé d'abord un fil inducteur, dans lequel devra passer le courant d'une pile : par-dessus, on a enroulé ensuite un fil beaucoup plus long et plus fin, qui constituera le circuit induit; le tout forme une grosse bobine S (fig. 505), terminée par deux disques de verre. — Dans l'intérieur de cette bobine, est placé un faisceau de fils de fer doux, qui s'aimantera sous l'action du courant inducteur chaque fois que ce courant sera établi, et qui perdra son aimantation chaque fois que ce courant sera interrompu. Ce faisceau de

fil de fer doux aura donc pour effet d'augmenter les effets d'induction produits par le courant de pile, comme il a été dit (602). — On a représenté, sur la gauche de la figure, marqués des signes + et —, les conducteurs qui mettent la pile en communication avec le fil *inducteur*. Les extrémités du fil *induit* traversent le disque de verre de droite, et viennent aboutir aux montures métalliques B et C, qui sont portées par des colonnes de verre isolantes : c'est dans ces montures que l'on fixera, au moyen de vis de pression, les fils *f* et *f'* qui serviront à recueillir les courants induits.

Dans la plupart de ces appareils, les alternatives de rupture et de fermeture du courant inducteur sont produites par un *interrupteur*,

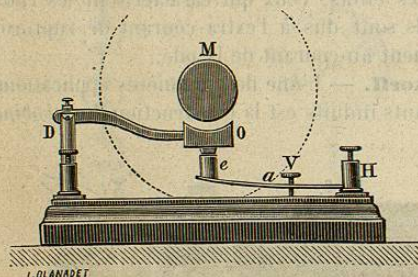


Fig. 504. — Interrupteur de la bobine de Ruhmkorff.

qui est joint à la bobine elle-même, et qui est représenté à droite dans la figure 503; la figure 504 en indique les détails, à une échelle un peu plus grande. — L'interrupteur se compose d'un petit marteau dont la tête O, qui est en fer doux, est placée à une petite distance au-dessous de l'extrémité du faisceau de fils de fer qui forme le noyau de la bobine et qui dépasse le disque de verre, comme le montre la figure 503; le manche du marteau, qui est en cuivre, est articulé à la partie supérieure de la colonne métallique D; au-dessous de la tête du marteau, est une sorte de petite enclume *e*, formée par un cylindre de cuivre vertical qui est supporté par une lame métallique *a* (fig. 504). — Les communications sont disposées de façon que le courant de la pile, avant d'arriver au fil inducteur, passe par l'enclume *e* et par le marteau OD qui est appliqué sur elle. Dès lors, dès que ce courant est établi, le faisceau de fils de fer s'aimante, attire la tête O du marteau, lui fait abandonner l'enclume, et le circuit inducteur est rompu : cette rupture déterminant la cessation du magnétisme dans le faisceau de fils de fer, le marteau retombe par son poids, et le courant est rétabli. Ces alternatives se reproduisent indéfiniment (*).

A chaque *rupture* du courant inducteur, il se développe dans le fil induit un courant *direct*; à chaque *rétablissement* du courant inducteur, un courant induit *inverse* : si donc on réunit les extrémités *f* et *f'* du

(*) La vis V, que représente la figure 504, permet de relever ou d'abaisser la lame *a*, et de régler ainsi la position de l'enclume *e* de manière que les allées et venues du marteau se reproduisent avec une rapidité convenable.

fil induit (fig. 503), on obtiendra, dans ce circuit, une série de courants dirigés alternativement dans un sens et dans l'autre.

Lorsqu'on laisse un petit intervalle entre les extrémités libres des fils *f* et *f'*, on peut faire éclater des étincelles à plusieurs centimètres de distance. — M. Poggendorff a montré que ces étincelles sont dues exclusivement au courant *direct*, produit au moment de la *rupture* du courant inducteur : le courant *inverse* n'a pas une tension suffisante pour franchir une épaisseur d'air appréciable (*).

Avec les bobines de grand modèle, on obtient des étincelles qui jaillissent à 40 ou 50 centimètres de distance, et qui se succèdent avec un bruit comparable à celui d'une série de coups de pistolet. — Avec ces bobines, on peut charger, en quelques secondes, les batteries électriques les plus puissantes.

609. **Interrupteur de Foucault.** — L'interrupteur à marteau, que nous venons de décrire, ne peut être employé avec les bobines de grandes dimensions. Au moment où le marteau abandonne l'enclume, la rupture du courant inducteur donnant naissance à un extracourant, il se produit une forte étincelle (607), avec arrachement de particules de platine, en sorte que les surfaces de l'enclume et du marteau seraient rapidement détériorées. — On emploie alors l'*interrupteur de Foucault* (fig. 505).

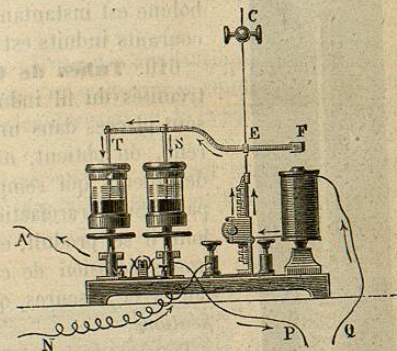


Fig. 505. — Interrupteur de Foucault.

Deux pointes de platine verticales T, S, sont fixées vers l'une des extrémités du levier TF, qui est supporté en E par une lame élastique verticale : au-dessous de ces pointes, se trouvent deux godets contenant du mercure, couvert d'une couche d'alcool; à l'autre extrémité du levier, est une armature de fer F, placée à une petite distance d'un électro-aimant. Le fil de cet électro-aimant communique, par l'une de ses extrémités Q, avec le pôle positif d'une petite pile spéciale, formée d'un ou deux éléments de Bunsen; par son autre extrémité,

(*) M. Fizeau a montré qu'on augmente beaucoup la puissance de la machine en y ajoutant un *condensateur* à grande surface, interposé dans le circuit inducteur. — Ce condensateur consiste en une série de feuilles d'étain, placées à l'intérieur du socle de bois qui supporte la bobine, et séparées par des feuilles de papier ciré : le papier ciré constitue la lame isolante; les feuilles d'étain sont les armatures, qui sont mises chacune en communication avec l'un des bouts du fil de la spirale inductrice. Les courants directs de rupture acquièrent une intensité beaucoup plus grande.