

que l'intercalation de l'instrument dans les circuits auxquels on l'applique ne modifie pas sensiblement l'intensité du courant. — Le cadran est gradué en ampères.

Les *voltmètres* offrent le même aspect extérieur que les ampèremètres ; mais les bobines sont à fil très fin et très long ; la résistance r , qui peut atteindre environ 2000 ohms, est toujours extrêmement grande par rapport à la résistance intérieure de la pile, ou du producteur d'électricité, dont on se propose d'évaluer la force électromotrice E à un instant donné. — Si, pendant un intervalle de temps très court, on relie les deux pôles de la pile aux deux bornes P et N, la différence de potentiel aux deux bornes prend une valeur v , un peu inférieure à E , mais qui en diffère d'autant moins que r est plus grand par rapport à la résistance intérieure de la pile. L'intensité du courant qui passe dans les bobines étant égale à $\frac{v}{r}$ (795), est proportionnelle à v , c'est-à-dire à E . La déviation de l'aiguille est donc proportionnelle à la force électromotrice de la pile. — Le cadran est gradué en volts.

III. — ACTIONS DES COURANTS SUR LES AIMANTS ET ACTIONS RÉCIPROQUES.

828. Action d'un courant fixe sur un aimant mobile. — Le passage d'un courant dans un fil conducteur donne toujours naissance à un champ magnétique (814) : les figures 577 et 580 représentent les lignes de force, dans le cas d'un courant rectiligne indéfini, et dans le cas d'un courant circulaire.

Lorsqu'un aimant mobile est placé dans le champ magnétique que produit un courant passant dans un conducteur fixe, chacun des pôles de l'aimant est sollicité par une force dirigée suivant la tangente à la ligne de force en ce point, et proportionnelle à l'intensité magnétique ; la force appliquée au pôle austral est dans le sens de la ligne de force qui passe par ce pôle ; la force appliquée au pôle boréal est de sens contraire à celui de la ligne de force. — Selon que les pôles de l'aimant, sollicités chacun à se mouvoir dans une direction déterminée, pourront obéir plus ou moins librement à ces actions, il pourra se produire tels ou tels mouvements. Nous allons en donner quelques exemples, dans des conditions que l'expérience permet de réaliser.

829. Exemples de mouvements divers, imprimés à des aimants par des courants. — 1° Le mouvement d'orientation d'un aimant sous l'action d'un courant est réalisé dans l'expérience d'Ersted (789). Quand le fil conducteur est placé horizontalement dans le méridien magnétique, au-dessus de l'aiguille aimantée (fig. 563), dès que le courant passe, les deux pôles de l'aiguille sont sollicités par deux forces

égales et contraires, constituant un couple, qui a pour effet de donner à l'aiguille une orientation telle que son pôle austral se porte à la gauche du courant.

2° Voici une disposition, due à Boisgiraud, dans laquelle l'action d'un courant communique à un aimant un mouvement de translation. —

Une aiguille aimantée très légère AB (fig. 595) est placée sur un flotteur, à la surface de l'eau ; sous l'influence de la Terre, elle s'oriente dans le plan du méridien magnétique, que nous sup-

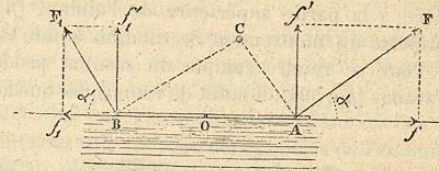


Fig. 595. — Expérience de Boisgiraud.

poserons être le plan de la figure. Perpendiculairement au méridien magnétique, on dispose un long fil de cuivre rectiligne, dont C représente la section, et dont les deux extrémités sont mises en communication avec les pôles d'une pile : l'aiguille prend un mouvement de translation suivant sa propre direction, mouvement dont le sens dépend du sens du courant et de la position du fil par rapport aux deux pôles magnétiques (*).

3° Faraday est parvenu à produire la rotation continue d'un aimant sous l'influence d'un courant, de la manière suivante. — On place verticalement, au milieu du mercure que contient une éprouvette de verre (fig. 594), un barreau aimanté a , lesté par un petit cylindre de platine p ; un anneau métallique K met le mercure en communication, par le contour de sa surface, avec le pôle négatif d'une pile ; le centre de cette même surface est mis en communication avec le pôle positif, au moyen

(*) Pour nous rendre compte de ce résultat, supposons que le courant soit dirigé, dans le fil C, d'arrière en avant du plan de la figure, et que ce fil soit placé au-dessus de la moitié australe OA de l'aiguille. Le pôle A sera sollicité par une force F , située dans le plan de la figure, perpendiculaire à CA, et dirigée à gauche du courant (789) ; de même, le pôle B sera sollicité par une force F_1 , située dans le même plan, perpendiculaire à CB et dirigée à droite du courant (puisque B est un pôle boréal). La force F peut se décomposer en deux autres, l'une f égale à $F \cos \alpha$ et dirigée suivant le prolongement de BA, l'autre f_1 verticale ; de même, F_1 peut se décomposer en une force f_1 égale à $F_1 \cos \alpha'$ et dirigée suivant le prolongement de AB, et une force verticale f_1' . Les deux forces verticales f' et f_1' sont trop faibles pour soulever l'aiguille ; les deux forces horizontales f et f_1 tendent à entraîner l'aiguille, l'une dans la direction BA, l'autre en sens contraire. Or, les intensités des forces F et F_1 étant inversement proportionnelles aux distances CA et CB, on a $F > F_1$; d'ailleurs l'angle α est plus petit que α' , et l'on a $\cos \alpha > \cos \alpha'$; donc $F \cos \alpha$ ou f est plus grand que $F_1 \cos \alpha'$ ou f_1 ; la résultante des deux forces f et f_1 est donc dirigée dans le sens BA. L'aiguille doit donc, dans ce cas, prendre un mouvement de translation suivant BA, c'est-à-dire dirigé du sud au nord, dans le plan du méridien magnétique. — Lorsque, par suite de ce mouvement, le milieu O arrive dans le plan vertical passant par la direction du courant, l'aiguille est animée d'une certaine vitesse qui lui fait dépasser cette position ; mais, la force f_1 devenant alors supérieure à f , la vitesse diminue, puis change de sens. L'aiguille oscille donc de part et d'autre de cette position d'équilibre stable, où elle finit par se fixer.

de la tige métallique T. Au moment où l'on ferme le circuit, on voit l'aimant se rapprocher de la tige T et prendre autour d'elle un mouvement continu de rotation, dans le sens des aiguilles d'une montre. — Ampère a modifié l'expérience de Faraday, en faisant plonger le conducteur T dans une petite capsule métallique, contenant du mercure et fixée à la partie supérieure de l'aimant (fig. 595). On voit l'aimant prendre un mouvement de rotation autour de son axe.

Pour se rendre compte du résultat produit, dans l'expérience de Faraday (fig. 594), il suffit de remarquer que les lignes de force du champ

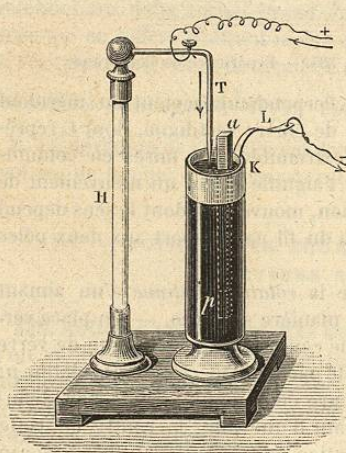


Fig. 594. — Rotation continue d'un aimant sous l'action d'un courant.

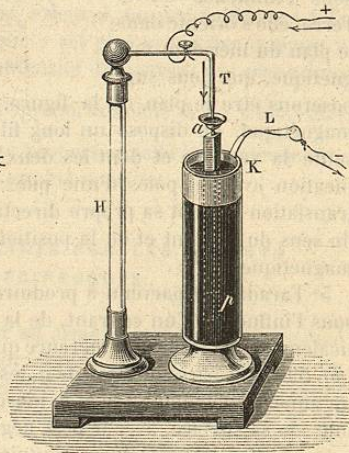


Fig. 595. — Rotation d'un aimant autour de son axe.

magnétique créé par le courant fermé TKL, dans la région de l'espace où peut se déplacer l'extrémité supérieure du barreau, ont à peu près la forme de circonférences horizontales (816), ayant leur centre sur l'axe du conducteur T; elles traversent l'intérieur du circuit en allant de la droite à la gauche du courant fermé (ici d'arrière en avant de la figure, dans le sens des aiguilles d'une montre); c'est dans ce sens que le pôle austral a doit décrire la ligne de force (*).

Le sens de la rotation est interverti, lorsque l'on renverse le courant, ou lorsque l'on retourne le barreau mobile bout pour bout.

(*) Dans l'expérience d'Ampère, il semble que le pôle austral a ne doive pas se déplacer, puisqu'il est situé sur l'axe du barreau, au centre des lignes de force. Mais, en réalité, il existe, à l'extrémité supérieure du barreau aimanté (fig. 595), une couche superficielle de magnétisme austral, chaque masse magnétique élémentaire étant la terminaison d'un filet magnétique (722). Chacune de ces petites masses doit se déplacer dans le sens des lignes de force.

D'une manière générale, un pôle austral doit être sollicité à traverser l'intérieur du courant fermé, dans le sens des lignes de force, en entrant par la droite et sortant par la gauche; un pôle boréal doit traverser le courant en sens contraire. — Il en résulte que les deux pôles d'un aimant mobile ne peuvent jamais traverser l'un et l'autre un même courant fermé, d'un mouvement de rotation continue.

830. Action exercée par un champ magnétique sur un élément de courant mobile. — Dans tous les cas, comme ceux qui précèdent, où un aimant mobile est placé dans le champ magnétique d'un courant fixe, le mouvement est déterminé par l'ensemble des actions exercées, par chacun des éléments du courant, sur chacun des pôles de l'aimant. — On a vu que l'action d'un élément MN de courant (fig. 578), sur un pôle magnétique A, est une force f , perpendiculaire au plan AMN, dirigée suivant la règle d'Ampère, et dont l'intensité est donnée par la formule de Laplace (815).

Inversement, sous l'action d'un pôle A, supposé fixe, l'élément de courant MN (fig. 596), supposé mobile, est sollicité par une force f' , égale à f , mais de sens contraire, c'est-à-dire dirigée vers la droite de l'élément de courant (*).

L'expression de la force f' est encore donnée par la formule de Laplace, $f' = \frac{m}{r^2} i \sin \alpha$; mais il est avantageux de mettre ici cette expression sous une forme un peu différente. On voit, en effet, que $\frac{m}{r^2}$

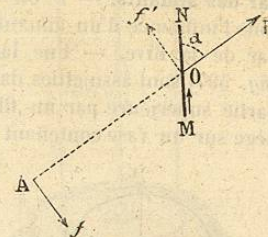


Fig. 596.

représente la force magnétique au point O (force exercée sur l'unité de magnétisme austral, supposée placée en O, par la masse m placée en A, à la distance r); en désignant cette force par F, il vient :

$$f' = Fi \sin \alpha.$$

Sous cette forme, la formule de Laplace exprime encore l'action exercée par un champ magnétique quelconque, sur un élément de cou-

(*) En réalité, l'action f de l'élément de courant sur le pôle A, et la réaction f' du pôle sur l'élément de courant, devant être deux forces égales et directement opposées (note de la page 5), on doit considérer la force f comme appliquée, soit en O, soit en un point quelconque du prolongement de la droite Of, pourvu que l'on suppose ce point invariablement lié au point A. Or, on démontre que la résultante de toutes les forces f exercées sur le pôle A, par tous les éléments d'un courant fermé, passe toujours par le point A. Dès lors, quand on veut se rendre compte de l'action électromagnétique exercée par un courant fermé sur un pôle austral placé en un point A, on ne change rien au résultat en supposant, comme nous l'avons fait (815), que chacune des forces élémentaires passe par ce point.

rant MN placé en un point O du champ. C'est une force Of' (fig. 596) appliquée au milieu O de l'élément, dirigée perpendiculairement au plan MNF qui contient l'élément du courant et la force magnétique F du champ au point O; elle est dirigée vers la droite de l'élément de courant, en supposant que l'observateur, couché dans l'élément de courant, ait son visage tourné du côté où vient la force magnétique.

Étant donné un conducteur mobile parcouru par un courant, et placé dans le champ magnétique produit par un aimant fixe, on conçoit que l'on puisse, à l'aide de la formule précédente, calculer l'action du champ produit par l'aimant, sur chaque élément de la partie mobile du courant; chacune de ces actions élémentaires est d'ailleurs dirigée à droite de l'élément de courant. — La résultante de toutes ces actions élémentaires imprimera au conducteur mobile un mouvement de telle ou telle nature, suivant les liaisons auxquelles il sera assujéti.

Nous allons en donner quelques exemples.

831. Exemples de mouvements divers, imprimés à des courants par des aimants. — 1° On obtient l'orientation d'un courant mobile, sous l'influence d'un aimant, au moyen des piles flottantes imaginées par de la Rive. — Une lame de zinc Z et une lame de cuivre C (fig. 597) sont assujétiées dans une rondelle de liège, et réunies à leur partie supérieure par un fil métallique rigide L; si l'on fait flotter le liège sur un vase contenant de l'eau acidulée, il se produit un courant

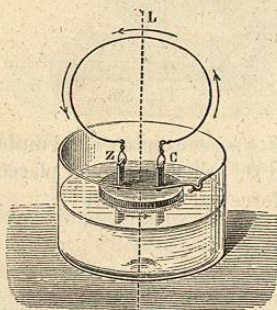


Fig. 597. — Pile flottante.

dans le circuit formé par le zinc Z, l'eau acidulée, le cuivre C et le fil L. — Ce courant circulaire mobile doit s'orienter, sous la seule action du champ magnétique terrestre, comme le ferait un aimant qui aurait sa ligne des pôles dirigée perpendiculairement au plan du courant: cela résulte de l'analogie que présentent les lignes de force d'un courant circulaire (fig. 580) avec celles d'une lame aimantée, couverte de magnétisme austral sur la face correspondante à la gauche du courant circulaire fermé (817, Rem). L'appareil, abandonné à lui-même, tend à se

mettre en équilibre perpendiculairement au méridien magnétique, la gauche du courant fermé se tournant vers le nord. — Cette expérience se réalise d'ailleurs plus facilement avec un autre dispositif, qui sera indiqué plus loin (fig. 602).
Si maintenant on place horizontalement un barreau aimanté au-dessus de la partie supérieure L, dans le plan du fil CLZ, on voit l'équipage se mettre en croix avec l'aimant. Le pôle austral d'un aimant mobile se placerait du côté du pôle boréal de l'aimant fixe (fig. 504):

c'est donc du côté de ce pôle boréal que doit toujours se placer la face qui correspond à la gauche du courant fermé.

2° Le même appareil (fig. 597) peut servir à obtenir un mouvement de translation d'un courant, sous l'influence d'un aimant. — Il suffit, pour cela, de placer le pôle du barreau aimanté un peu en avant du circuit CLZ, et à la hauteur de son centre, l'axe du barreau étant perpendiculaire au plan du courant. — Si c'est le pôle austral qu'on présente, l'expérience montre qu'il y a répulsion. Tout se passe, en effet, comme si l'on présentait le pôle austral du barreau au pôle austral d'un aimant mobile, puisque la gauche du courant fermé CLZ est en avant de la figure. — En présentant le pôle boréal de l'aimant, on observera une attraction.

3° L'action d'un aimant fixe peut aussi produire la rotation continue d'une portion de courant mobile. C'est ce que montre l'expérience suivante, inverse, quant au résultat, de celle que nous avons décrite plus haut (829, 3°). — Une cuvette de zinc DD (fig. 598), contenant de l'eau aiguisée d'acide sulfurique, porte en son centre une colonne métallique H; sur la coupelle o qui termine cette colonne, repose, par une pointe qui plonge dans du mercure, un équipage formé de deux fils métalliques verticaux b et c, et d'un cercle de cuivre horizontal plongé dans l'eau de la cuvette: l'équipage tout entier est ainsi rendu mobile autour d'un axe vertical passant par la pointe i. Il se développe un courant, dans le circuit formé par le zinc de la cuvette, le liquide acide, le cercle de cuivre, les fils verticaux et la colonne H; ce courant marche dans le sens des flèches de la figure. Si l'on place le pôle d'un aimant K au-dessous de la colonne métallique H, l'équipage prend un mouvement de rotation continu autour de son axe. — Si c'est le pôle austral de l'aimant qui a été présenté, on remarquera que, pour chaque élément rectiligne du courant ascendant c, la droite du courant est en avant de la figure, et que, pour chaque élément du courant b, la droite du courant est en arrière de la figure, quand on a égard aux lignes de force qui divergent du pôle austral, de bas en haut, à droite et à gauche. Les

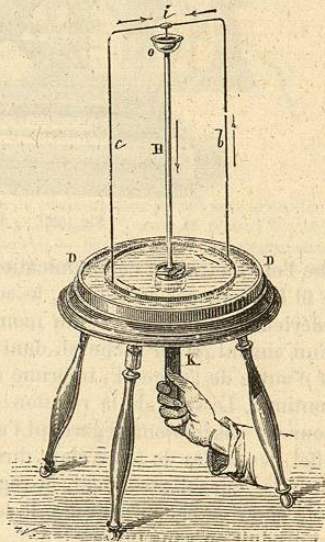


Fig. 598.
Rotation continue d'un courant
sous l'action d'un aimant.

actions électromagnétiques, appliquées à chacun des éléments de *c* et de *b*, doivent donc déterminer un mouvement de rotation dans le sens indiqué par les flèches : c'est ce que l'expérience vérifie. — Quant à la continuité du mouvement, on peut s'en rendre compte en remarquant que les courants verticaux conservent, quelle que soit leur position absolue, la même position par rapport à l'aimant.

4° On produit encore la *rotation continue* d'une portion de courant mobile, dans l'expérience de la *roue de Barlow* (fig. 599). — Une roue de cuivre dentée est mobile autour d'un axe métallique C, qui communique par le fil N avec le pôle négatif d'une pile; une ou plusieurs dents de la roue plongent dans une auge DF, contenant du mercure,

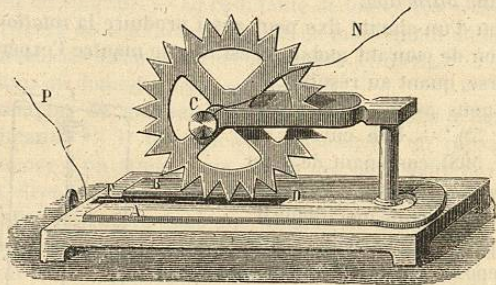


Fig. 599. — Roue de Barlow.

que l'on mettra en communication avec le pôle positif de la pile, par le fil P : dans ces conditions, le courant sera ascendant dans la partie inférieure de la roue. — Au moment où l'on ferme le circuit, l'action d'un aimant en fer à cheval, dont les deux branches sont fixées de part et d'autre de l'auge DF, imprime à la roue un mouvement de rotation continue. Le sens de la rotation est celui des aiguilles d'une montre, pour un observateur regardant l'appareil du côté du pôle austral A. En effet, les lignes de force étant dirigées de A en B, un observateur placé dans le courant ascendant, et regardant le pôle A, aurait sa droite du côté de F. — Si l'on renverse le sens du courant, la rotation de la roue se produit en sens inverse (*).

Cet appareil peut être considéré comme constituant un moteur

(*) Dans toutes les expériences où l'on veut pouvoir, à volonté, établir le courant dans un circuit, supprimer le courant, ou renverser le sens du courant, il est commode de faire usage d'un *commutateur*, comme celui que représentent les figures 600 et 601.

La pièce C est un cylindre d'ivoire, qu'on peut faire tourner autour d'un axe horizontal au moyen du bouton B. Sur ce cylindre sont appliquées deux plaques de cuivre P et P', amincies vers leurs bords, et laissant à découvert (fig. 601), à droite et à gauche, une partie du cylindre C. — La plaque P est en communication, par la vis *b* (fig. 600), avec le demi-axe métallique *d'* et la borne métallique AA'; la plaque P' est en communication, par la vis *a*, avec le demi-axe *d* et la borne A. — Deux autres bornes,

électro-magnétique. Supposons en effet que l'on suspende un corps pesant à l'extrémité d'un fil fixé en un point de l'axe C : lorsqu'on fera passer un courant suffisamment intense, le mouvement de rotation de la roue aura pour effet d'enrouler le fil sur l'axe, en soulevant le poids qui y est suspendu. — Une partie de l'énergie dépensée sous forme de courant se retrouvera dans le travail mécanique produit par le moteur électromagnétique.

placées de part et d'autre du commutateur (fig. 601), communiquent avec les ressorts métalliques R et R'.

Mettons le pôle positif de la pile en communication avec R, et le pôle négatif avec R'; les bornes A et A' sont en communication avec le conducteur dans lequel devra passer le courant. — Quand le commutateur sera dans la position de la figure 601, le

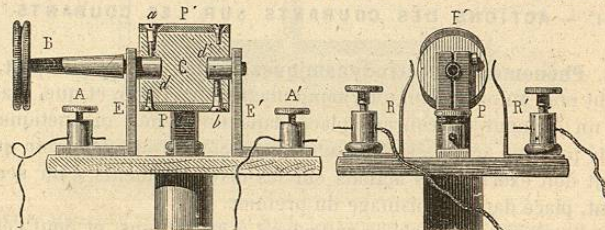


Fig. 600. — Commutateur.

Fig. 601.

courant ne passera pas. — Si l'on fait tourner le commutateur de 90° vers la droite, la plaque P viendra en contact avec le ressort R; la plaque P', avec le ressort R', et le courant passera dans le conducteur, de A' vers A. — Si on renverse le commutateur, de 180°, les contacts des deux plaques avec les ressorts seront intervertis, et le courant passera de A en A' dans le conducteur.