Expérience. — Cette loi se démontre au moyen d'un appareil ne différant du précédent que parce qu'il n'a qu'un seul vase (fig. 981). Le courant montant par la colonne *a* passe dans les deux fils *cc* et descend par les fils *bb*, d'où il revient à la pile. C'est alors que le circuit *bccb* se met à tourner d'un mouvement continu, de l'est à l'ouest ou de l'ouest à l'est, suivant que dans les fils *cc* le courant est centrifuge ou centripète. Or on a vu (1046) que l'action de la terre sur les fils verticaux *bb* est détruite; c'est donc bien par son action sur les branches horizontales *cc* que la rotation se produit.

1048. **Position du courant terrestre.** — Cette expérience, comme la précédente, peut s'expliquer par l'action d'un courant terrestre, allant de l'est à l'ouest magnétique. Elle permet, en outre, de déterminer la situation du courant terrestre. En effet, ce courant peut avoir trois positions par rapport au courant horizontal mobile : il peut être soit au nord de ce courant, soit au sud, soit *au-dessous*, dans le même plan que l'axe de rotation. Or les lois de l'électrodynamique, démontrées ci-dessus, prouvent que :

1° Si le courant terrestre était *au nord*, le courant mobile tournerait de l'est à l'ouest, *en passant par le sud;* ce qui est contraire à l'expérience.

2° Si le courant terrestre était *au-dessous*, le courant mobile resterait en équilibre dès qu'il se serait mis parallèle au courant directeur et de même sens : il ne tournerait donc pas d'une manière continue, comme cela a lieu réellement.

3° Si le courant terrestre est *au sud*, les choses doivent, au contraire, se passer comme l'indique l'expérience.

Tout se passe donc comme si le courant terrestre était au sud des courants mobiles. Les phénomènes et, par suite, la conclusion seraient les mêmes en tous les points de notre hémisphère. D'ailleurs, si l'on se transportait dans l'hémisphère sud, on trouverait qu'en tous les points le mouvement de rotation aurait lieu en sens inverse. On en conclurait, par les mêmes raisonnements, que le courant terrestre est au nord de cet hémisphère.

Donc, en résumé, la terre agit en tout lieu comme *un courant indéfini tournant de l'est à l'ouest autour, et dans le plan même, de l'équateur magnétique.*

1049. **Orientation des courants fermés, mobiles autour d'un axe vertical.** — Si le circuit est fermé, qu'il soit rectangulaire ou circulaire, ce n'est plus *un mouvement de rotation continu* qui se produit, mais *une simple orientation*, comme dans le cas des courants verticaux (1046).

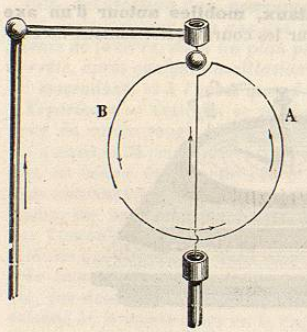

Fig. 982.

Le courant vient se placer dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique, de manière qu'il soit descendant à l'est de son axe de rotation pour un observateur qui regarde le nord, et ascendant à l'ouest.

Ce fait est une conséquence directe des lois précédentes. Il en résulte, en effet, que dans le circuit fermé (fig. 982) les actions de la terre sur les parties horizontales, inférieure et supérieure, sont égales et inverses et, par conséquent, se font équilibre, tandis que dans les parties latérales le courant tend à se placer d'un côté à l'est, de l'autre à l'ouest, d'après la loi des courants verticaux (1046).

1050. **Courants astatiques.** — Dans les expériences d'électrodynamique, il est donc nécessaire de soustraire les circuits mobiles à l'action directrice de la terre. Pour cela il suffit de leur donner une forme symétrique par rapport à leur axe de suspension. De cette manière les actions directrices de la terre sur les deux parties du circuit tendent à les faire tourner en sens contraires, et, par suite, se détruisent. Cette condition est remplie dans les circuits représentés dans les figures 960 et 962. C'est pourquoi on donne aux courants qui les parcourent le nom de *courants astatiques.*

CHAPITRE VI

EFFETS MÉCANIQUES DES COURANTS.

ÉLECTROMAGNÉTISME.

1051. **Orientation des aimants par les courants.** — L'action que les courants exercent sur les aimants se manifeste par trois sortes d'effets : 1° effets d'orientation ; 2° effets de rotation ; 3° effets d'attraction ou de répulsion. De plus, tous ces effets sont *réciproques*, c'est-à-dire que, de même que les courants agissent sur les aimants, réciproquement ceux-ci agissent sur les courants, pour les diriger, les faire tourner, les attirer ou les repousser. L'étude de ces actions et réactions entre les aimants et les courants est désignée par le nom d'*électromagnétisme.*

1052. **Orientation des aimants par les courants.** — 1° *Expérience d'Œrsted.* — *Règle d'Ampère.* — L'action directrice des courants sur les aimants fut découverte en 1820 par Œrstedt, professeur de physique à Copenhague. C'est une des expériences fondamentales de l'électricité dynamique.

Pour répéter l'expérience d'Œrsted, on tend horizontalement, dans la direction du méridien magnétique, un fil de cuivre au-dessus d'une aiguille aimantée mobile (fig. 983). Tant que le fil n'est point traversé par un courant, l'aiguille lui demeure parallèle ; mais aussitôt qu'on lance un courant dans le fil, l'*aiguille*

est déviée, et elle *se rapproche d'autant plus de la direction perpendiculaire au courant que celui-ci est plus intense.*

Règle d'Ampère. — Quant au sens de la déviation, il dépend à la fois de la direction du courant et de la position du fil par rapport à l'aiguille. Ampère a réussi à comprendre et à prévoir tous les cas qui peuvent se présenter dans cet énoncé unique, appelé *règle d'Ampère : Le pôle austral de l'aimant mobile est toujours dévié vers la gauche du courant.*

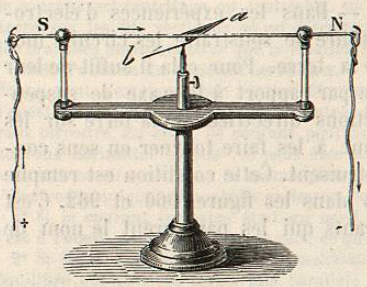

Fig. 983.

Il appelle *gauche* du courant, celle d'un observateur placé dans le fil qui réunit les deux pôles, de manière que, le courant entrant par les pieds et sortant par la tête, la face soit tournée vers l'aiguille (fig. 984).

1053. **Orientation des courants par les aimants.** — *L'action directrice des courants sur les aimants est réciproque.* Dans l'expérience d'Œrsted (fig. 983), l'aiguille aimantée étant mobile, et le courant fixe, c'est l'aiguille qui se dirige et se met en croix avec le courant. Si, au contraire, l'aimant est fixe et le courant mobile, c'est celui-ci qui se dirige et vient se mettre en croix avec l'aimant, le pôle austral occupant toujours la gauche.

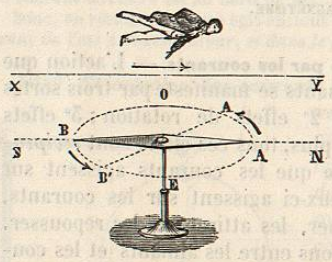

Fig. 984.

Pour le démontrer, on fait passer un courant dans un circuit mobile (fig. 985). Approchant alors un barreau aimanté, on voit le circuit tourner, et, après quelques oscillations, se mettre en croix avec le barreau.

1054. **Rotation des aimants sous l'influence des courants.** — Les effets de rotation ont été démontrés par Faraday, à l'aide des expériences suivantes (fig. 986). 1° Au centre d'une large éprouvette remplie de mercure plonge un barreau aimanté A, de 20 centimètres de longueur environ, lesté à sa partie inférieure par un appendice de

platine, et s'élevant de quelques millimètres au-dessus du niveau du mercure. A la partie supérieure du barreau est une cavité contenant du mercure. Un courant, montant par la colonne *m*, ar-

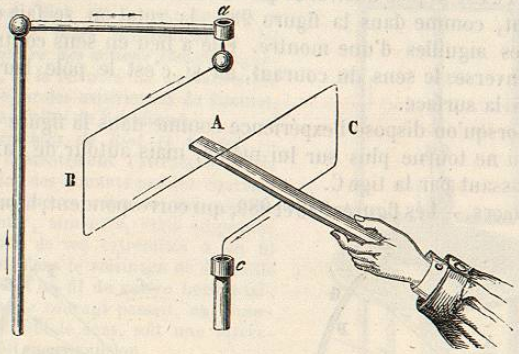

Fig. 985.

rive au mercure et au barreau, d'où, rayonnant tout autour de celui-ci, il gagne une pièce annulaire de cuivre G, qui plonge

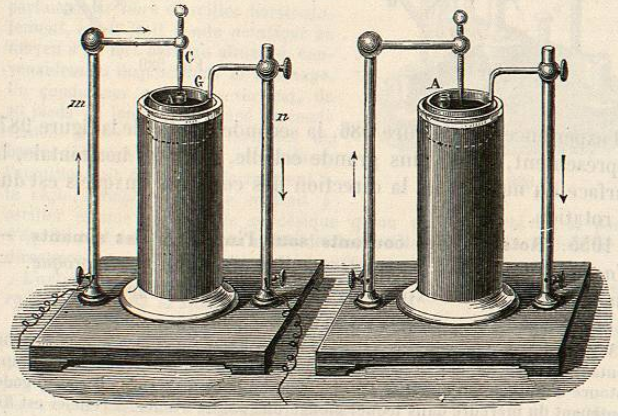

Fig. 986. Fig. 987.

dans le mercure le long de la paroi de l'éprouvette, gagne la colonne *n* et retourne à la pile. Dès que le courant passe, on voit le barreau tourner autour de son axe avec une vitesse croissante

qui dépend de son moment magnétique et de l'intensité du courant. Quant au sens de la rotation, il dépend de la direction du courant et de la nature du pôle qui flotte à la surface du mercure. Si c'est le pôle austral et que le courant soit descendant vers l'aimant, comme dans la figure 986, la rotation se fait dans le sens des aiguilles d'une montre. Elle a lieu en sens contraire si l'on renverse le sens du courant, ou si c'est le pôle boréal qui flotte à la surface.

2° Lorsqu'on dispose l'expérience comme dans la figure 987, le barreau ne tourne plus sur lui-même, mais autour de l'axe vertical passant par la tige C.

Remarque. — Les figures 988 et 989, qui correspondent, la première

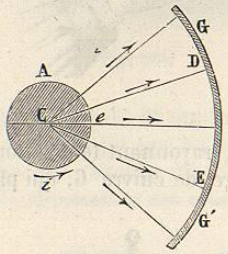

Fig. 988.

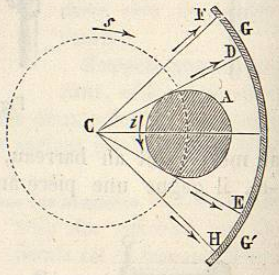

Fig. 989.

à l'expérience de la figure 986, la seconde à celle de la figure 987, représentent, à une plus grande échelle, en coupe horizontale, la surface du mercure et la direction des courants auxquels est due la rotation.

1055. **Rotation des courants sous l'influence des aimants.** — *L'action rotative des courants sur les aimants est réciproque.* — On le vérifie par l'expérience suivante, due à Faraday.

Sur un pied à vis calantes est fixée une colonne de cuivre *b*D isolée par un contact d'ivoire, le long de laquelle s'élève plus ou moins un tube métallique entouré d'un faisceau aimanté AB (fig. 990). En haut de la colonne est un godet contenant du mercure dans lequel plonge une pointe d'acier. A celle-ci est fixé un circuit EF, de cuivre rouge, dont les bouts portent des pointes d'acier qui plongent dans un réservoir plein de mercure.

On fait arriver le courant d'une pile de 4 ou 5 couples de Bunsen à la borne *b*; de là il monte dans la colonne D, redescend par les deux branches E, F, gagne le mercure par les pointes d'acier, et se rend par le support de cuivre à la borne *a*, d'où il revient à la pile. Or, si l'on élève alors le faisceau aimanté, comme le montre le dessin, le circuit mobile EF prend un mouvement de

rotation rapide dans un sens ou dans l'autre, suivant qu'il est soumis à l'action du pôle austral ou du pôle boréal de l'aimant.

1056. **Effets de déplacement.** — Ils consistent en attractions et en répulsion exercées par les courants sur les aimants. Ils ont été constatés et étudiés par Biot et Savart; Laplace a déduit de leurs expériences la *loi élémentaire des actions électromagnétiques*, et la formule de Laplace a été vérifiée par des expériences de Pouillet, puis par celles de Boisgiraud.

Expériences de Biot et Savart. — 1° Ils démontraient l'attraction ou la répulsion des aimants par les courants par l'expérience suivante. Une aiguille à tricoter, aimantée, était suspendue par l'une de ses extrémités à un fil très fin; dans le voisinage de l'aiguille on tendait un fil de cuivre horizontal: dès que le courant passait, on observait, suivant le sens, soit une attraction, soit une répulsion.

2° Après avoir constaté l'existence de cette force attractive, ils ont déterminé *suivant quelle loi elle varie avec la distance*. Pour cela, ils prenaient un aimant prismatique très court, suspendu à un fil de soie sans torsion et parfaitement *libre* d'osciller horizontalement, car il était rendu *astatique* au moyen d'un fort barreau aimanté, convenablement disposé dans le voisinage. Un conducteur rectiligne vertical, de 10 pieds de long, était placé successivement à des distances variables du barreau. Dès qu'on lançait ce courant, l'aiguille était déviée conformément à la règle d'Ampère, elle se mettait à osciller comme un pendule géodésique qu'on aurait écarté de sa position d'équilibre. En appliquant la méthode des oscillations, ils évaluaient la force directrice dans chaque position. Ils trouvèrent ainsi que

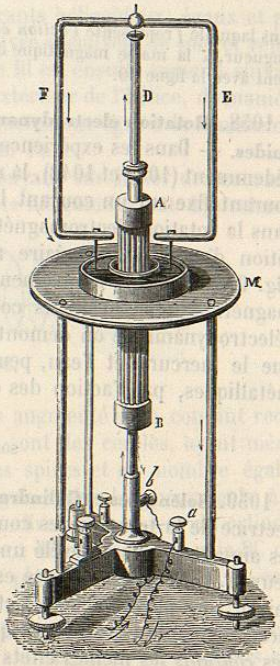

Fig. 990.

L'action d'un courant vertical indéfini sur un pôle d'aimant varie en raison inverse de la simple distance.

1057. **Loi élémentaire. — Formule de Laplace.** — Laplace, en appliquant le calcul à ces lois, a trouvé que l'action exercée par un élément de courant sur un pôle magnétique varie *en raison inverse du carré de la distance et proportionnellement au sinus de l'angle* que fait, avec la direction du courant, la ligne qui joint son centre au pôle magnétique. Cette force est appliquée à l'élément du courant, perpendiculairement au plan déterminé par l'élément et le pôle, et elle est dirigée conformément à la règle d'Ampère (fig. 991).

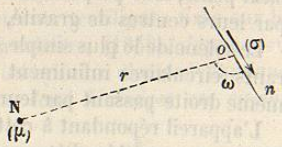

Fig. 991.

La loi élémentaire est exprimée par la formule

$$f = \frac{\mu I \sigma}{r^2} \sin \omega,$$

dans laquelle f représente l'*action élémentaire*, I l'intensité du courant et σ sa longueur, μ la masse magnétique du pôle, r sa distance et ω l'angle de l'élément avec la ligne NO.

1058. **Rotation électrodynamique et électromagnétique des liquides.** — Dans les expériences d'électrodynamique décrites précédemment (1040 et 1042), la rotation s'obtient en faisant agir un courant fixe sur un courant linéaire mobile. Il en est de même dans la rotation électromagnétique de la figure 990. Or cette condition d'un circuit linéaire n'est pas nécessaire. On a déjà vu (fig. 986 et 987) le mouvement de rotation transmis à une masse magnétique plus ou moins considérable, et dès la découverte de l'électrodynamique on démontra que les liquides eux-mêmes, tels que le mercure et l'eau, peuvent tourner, comme des circuits métalliques, par l'action des courants.

SOLÉNOÏDES.

1059. **Solénoïdes** et **Cylindres électrodynamiques.** — L'action directrice de la terre sur les courants, comparable à son action sur les aimants, nous a révélé une certaine analogie entre ceux-ci et ceux-là. Cette ressemblance est encore plus accusée par la comparaison des phénomènes électromagnétiques et des phénomènes électrodynamiques : on voit que les *aimants* subissent de la part des *courants* les mêmes effets de déplacement, d'orientation et de rotation que s'ils étaient eux-mêmes des courants, et réciproquement. La ressemblance des deux ordres de phénomènes est poussée jusqu'à l'identité dans les propriétés d'un appareil imaginé par Ampère sous le nom de *solénoïde*.

Le *solénoïde* proprement dit, tel que l'a défini Ampère, n'est pas un appareil, mais une conception mathématique. En effet, Ampère appelle *solénoïde* un assemblage de courants fermés, *infiniment petits*, tous perpendiculaires à une même ligne qui passerait par leurs centres de gravité, et tous dirigés dans le même sens.

Le solénoïde le plus simple serait, par exemple, une série de courants circulaires infiniment petits, tous perpendiculaires à une même droite passant par leurs centres.

L'appareil répondant à cette définition n'est pas plus réalisable, ni plus susceptible d'être soumis à l'expérience, que ne l'est le *pendule simple*. Mais on construit, sous le nom impropre de *solénoïde* ou sous le nom mieux approprié de *cylindre électrodynamique*, un appareil qui est au solénoïde d'Ampère ce que le *pendule composé* est au *pendule simple*.

Il consiste en un système de courants hélicoïdaux, égaux et parallèles, formés d'un même fil de cuivre recouvert de soie et replié sur lui-même en hélice (fig. 992) ; le fil est ensuite ramené suivant l'axe soit dans l'intérieur, soit à l'extérieur de l'hélice, de manière que le courant rectiligne BC soit exactement égal à la somme des projections des courants sinueux sur l'axe.

On démontre aisément, en s'appuyant sur la loi des courants sinueux, que ce système de courants héliçoïdaux est équivalent à

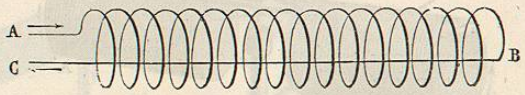

Fig. 992.

un système de courants circulaires augmenté d'un courant rectiligne de même sens. Les premiers sont des cercles, ayant même rayon que le cylindre directeur des spires et en nombre égal à celui des spires ; le courant rectiligne a une longueur égale à la somme des pas de ces spires, c'est-à-dire à la longueur du cylindre directeur. Ce courant rectiligne étant détruit par la partie BC qui revient en sens inverse, il ne reste plus que le système de courants circulaires.

D'autre part, on démontre qu'un système de courants circulaires de rayon fini est équivalent à un faisceau de courants circulaires infiniment petits, tous parallèles et tous de même sens, disposés comme l'indique la figure 995. Par conséquent, un cylindre électrodynamique est équivalent à un faisceau de solénoïdes, de même qu'un pendule composé est équivalent à un faisceau de pendules simples. Les lois expérimentales qu'on trouvera avec les premiers s'appliqueront aux solénoïdes et en vérifieront la théorie mathématique.

1060. **Action des courants sur les solénoïdes.** — Les lois expérimentales relatives à l'action des courants rectilignes fixes sur les courants finis, rectangulaires ou circulaires (1039), s'appliquent évidemment à chacune des spires d'un cylindre électrodynamique. Il en résulte qu'*un courant rectiligne tend à diriger ces circuits parallèlement à lui-même.*

On constate ce fait à l'aide d'un solénoïde construit de manière à pouvoir être suspendu sur l'appareil représenté dans la figure 993. Le solénoïde est

alors très mobile autour d'un axe vertical, et si l'on place en dessous, parallèlement à son axe, un fil rectiligne PQ, traversé par un courant qui passe en même temps dans les fils du solénoïde, on voit celui-ci *tourner et se mettre en croix avec le courant*. Dans cette position d'équilibre, ses spires se trouvent parallèles au courant fixe, et de plus, dans la partie inférieure de chacune d'elles, le courant est de même sens que dans le fil rectiligne (1059).

Si, au lieu de faire passer horizontalement un courant rectiligne au-dessous du solénoïde, on le fait passer verticalement sur le côté, on observe soit une attrac-

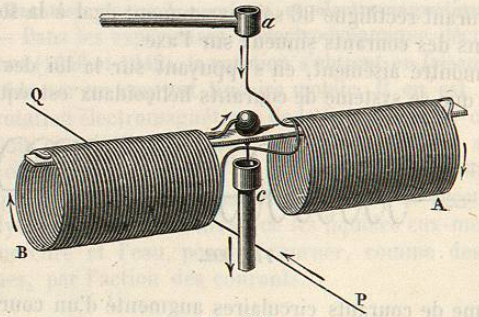

Fig. 993.

tion, soit une répulsion, suivant que, dans le fil vertical et dans la partie du solénoïde la plus voisine, les deux courants sont de même sens ou de sens contraires (1053).

1061. **Action directrice de la terre sur les solénoïdes.** — *La terre agit sur les solénoïdes comme sur les courants fermés ou sur les aimants.*

En effet, si l'on pose le solénoïde à suspension sur l'appareil de la figure 957, et qu'on le dirige d'abord hors du méridien magnétique, on observe que l'appareil se met en mouvement dès qu'on y lance un courant assez énergique, puis qu'il s'arrête dans une certaine position d'équilibre : il a alors une direction telle, que son axe est parallèle à l'aiguille de déclinaison. De plus, dans la partie inférieure de ses spires le courant est dirigé de l'est à l'ouest.

Le solénoïde se dirige donc sous l'influence du magnétisme terrestre comme une aiguille aimantée; on est donc fondé à nommer *pôle austral*, de même que dans les aimants, l'extrémité qui se dirige vers le nord, et *pôle boréal* celle qui se dirige vers le sud.

1062. **Actions mutuelles des aimants et des solénoïdes.** — On observe entre les solénoïdes et les aimants les mêmes phénomènes d'attraction et de répulsion qu'entre les aimants.

En effet, si l'on présente à un solénoïde mobile, parcouru par un courant, l'un des pôles d'un fort barreau aimanté, il y a répulsion ou attraction, suivant que les pôles de l'aimant et du solénoïde mis en présence sont de même nom ou de noms contraires. *Réciproquement*, le même phénomène a lieu si l'on

présente à une aiguille aimantée mobile un solénoïde qu'on tient à la main, et parcouru par un courant.

1063. **Actions mutuelles des solénoïdes.** — Lorsqu'on fait agir l'un sur l'autre deux solénoïdes parcourus par un courant assez intense, l'un qu'on tient à la main, l'autre mobile autour d'un axe vertical (fig. 994), on observe, entre les extrémités de ces deux solénoïdes, des phénomènes d'attraction et de répulsion identiques avec ceux que présentent entre eux les pôles des aimants; ces

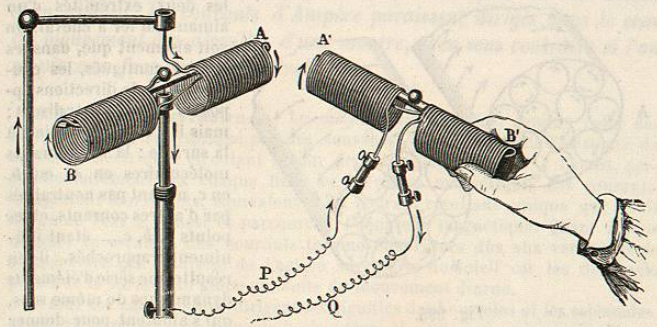

Fig. 994.

phénomènes peuvent se prévoir d'après la direction relative des courants dans les extrémités mises en présence (1033).

1064. **Théorie d'Ampère sur le magnétisme.** — L'ensemble de ces expériences prouve que les cylindres électrodynamiques, et par suite les solénoïdes, se comportent exactement comme des aimants, et paraissent constitués de la même manière. Ampère démontra en outre, par le calcul, que non seulement le sens des actions est le même, mais que leurs valeurs numériques sont identiques et sont représentées par la même *formule élémentaire*. Se fondant sur tous ces faits, Ampère imagina une théorie du magnétisme qui fit rentrer tous les phénomènes magnétiques dans le domaine de l'électrodynamique.

Au lieu d'attribuer les phénomènes magnétiques à l'existence de deux fluides spéciaux, Ampère les attribua à des courants circulaires, préexistant autour de chaque particule des substances magnétiques. Quand ces substances ne sont pas aimantées, leurs courants particulaires sont enchevêtrés dans toutes les directions, et la résultante de leurs actions électrodynamiques est nulle; mais sous l'influence d'un aimant ou d'un courant puissant ces cou-

rants s'orientent et prennent une certaine position d'équilibre, conformément aux lois de l'électrodynamique; non seulement alors ils sont orientés dans le même sens et dans des plans parallèles, mais leurs centres sont disposés en séries linéaires parallèles à l'axe du barreau qu'on aimante, en sorte que celui-ci devient un véritable *faisceau de solénoïdes*, dont l'ensemble agit comme un solénoïde unique.

La figure 995 représente, par une suite de petits cercles intérieurs, les courants particulaires orientés dans les deux extrémités d'un aimant en fer à cheval. On voit aisément que, dans les parties contiguës, les courants sont de directions opposées et se neutralisent; mais il n'en est plus ainsi à la surface : là les courants moléculaires en *a*, en *b*, en *c*, n'étant pas neutralisés par d'autres courants, et les points *a*, *b*, *c*.... étant infiniment rapprochés, il en résulte une série d'éléments dynamiques de même sens, qui s'ajoutent pour donner un courant circulaire unique à la surface du barreau. Or, le même effet se produisant dans chaque section du barreau perpendiculaire à l'axe, tout se passe comme si le barreau était un solénoïde complet.

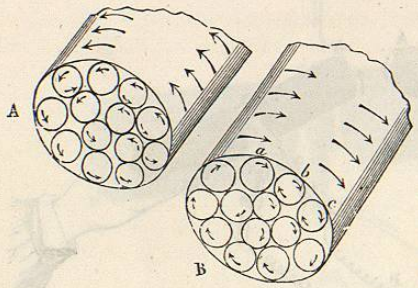

Fig. 995.

1065. **Différence entre les solénoïdes et les aimants.** — Entre les solénoïdes et les aimants il existe une différence : c'est que dans les premiers les pôles sont *aux extrémités mêmes*, tandis que dans les aimants ils sont, comme nous l'avons vu, *à une certaine distance des extrémités*, distance qui augmente avec le diamètre des barreaux.

Cette différence n'est pas une anomalie, mais une conséquence même de la théorie d'Ampère. En effet, en calculant la position des pôles d'un solénoïde unique, on trouve qu'ils doivent être placés *rigoureusement à chaque extrémité*. Or un barreau aimanté n'est pas un solénoïde unique, mais un faisceau de solénoïdes parallèles. Ces solénoïdes élémentaires sont rectilignes dans la partie centrale du barreau, tandis que près de la surface ils sont repoussés par ceux du centre, surtout à leurs pôles, et ils se courbent en présentant leur convexité vers l'axe du barreau. Leurs pôles se rapprochent ainsi de la section médiane de l'aimant, et il en est de même des pôles de l'aimant, qui ne sont autre chose que les points d'application de la résultante des forces appliquées à tous les pôles des solénoïdes élémentaires.

1066. **Direction des courants d'Ampère dans les aimants.** — Il est possible de reconnaître dans quel sens sont dirigés les courants d'Ampère dans les aimants. Considérons, en effet, un solénoïde mobile, parcouru par un courant (fig. 993). Lorsqu'il s'est placé en équilibre dans le méridien magnétique, son pôle austral

A était dirigé vers le nord. D'après l'action directrice que la terre exerce sur les courants fermés (1046), le courant, dans la partie inférieure de chaque spire, est dirigé de l'est à l'ouest, ou, ce qui revient au même, de gauche à droite pour l'observateur qui, placé dans le prolongement de l'axe du solénoïde, en regarde le pôle austral. Si l'on regarde le pôle boréal, c'est l'inverse qui a lieu : le courant, dans la partie inférieure de chaque spire, est alors dirigé de droite à gauche.

Par conséquent, *si l'on se place en face du pôle sud ou boréal d'un aimant, les courants d'Ampère paraissent dirigés dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre, et en sens contraire si l'on se place en face du pôle austral.*

1067. **Courant terrestre.** — Le *magnétisme terrestre*, comme celui des aimants, peut être expliqué par des courants. Ampère a admis l'existence de courants électriques circulant autour de notre globe, de l'est à l'ouest, perpendiculairement, en chaque lieu, au méridien magnétique. Ces courants, en ajoutant leurs effets, équivalent à un courant résultant unique qui serait dirigé de l'est à l'ouest et parcourrait l'équateur magnétique. Quant à leur origine, ce seraient des courants thermo-électriques dus aux variations de température qui résultent de l'action successive du soleil sur les différents points de la surface du globe par suite du mouvement diurne.

Ce sont ces courants qui dirigent les aiguilles des boussoles et les solénoïdes, et qui agissent sur les courants horizontaux et verticaux, comme on l'a vu plus haut (1046 et 1047). L'hypothèse du courant terrestre est parfaitement conforme aux lois expérimentales de l'action de la terre sur les courants (1045).

APPLICATION DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME.
SYSTÈME DES UNITÉS ÉLECTRIQUES ABSOLUES C. G. S.

1068. **Définitions.** — Gauss eut le premier l'idée de substituer aux unités arbitraires, dans la mesure des grandeurs électriques et magnétiques, un système d'unités *absolues*, c'est-à-dire ne dépendant que d'un petit nombre d'unités fondamentales. Ces unités fondamentales, dites *unités absolues*, ont pu être réduites à trois : une unité de *temps*, la *seconde*; une unité de *longueur*, le *centimètre*; et une unité de *masse mécanique*, la *masse du gramme*. Ce sont les unités dites *C. G. S.*

Il y a quatre grandeurs électriques : la quantité d'électricité Q, l'intensité du courant I, la force électromotrice des piles E et la résistance des conducteurs R. Or entre ces quantités il existe trois équations qui sont les expressions de trois lois physiques :

[1] $Q = It,$ (Définition de I)

[2] $I = \frac{E}{R},$ (Loi d'Ohm)

[3] $\mathfrak{C}$ ou $C = I^2Rt.$ (Loi de Joule)[1]

1. Nous énoncerons et nous démontrerons cette loi plus loin (1087).

Dans ces équations t représente le temps et $\mathcal{T}$ ou C représente soit le travail, soit la chaleur *équivalente*. On peut donc exprimer trois de ces grandeurs en fonction de la quatrième; et il suffira d'avoir une relation entre l'une d'elles et l'unité absolue pour pouvoir évaluer toutes les grandeurs électriques en unités absolues. L'ensemble de ces mesures constituera un *système d'unités électriques absolues*.

Il n'existe pas de relation directe entre une des grandeurs électriques et les grandeurs qu'on a prises pour unités absolues, c'est-à-dire le temps, l'espace et la masse mécanique; mais il existe de nombreuses relations entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques. Ainsi la loi de Coulomb et les lois d'Ampère lient la force mécanique soit à la *masse électrique*, soit à l'intensité. Or, comme on peut exprimer la force en fonction de la masse *mécanique* et de l'accélération qui est une longueur, on voit qu'on peut, en définitive, évaluer les grandeurs électriques en unités absolues de temps, d'espace et de masse.

Si l'on choisit la loi de Coulomb pour rattacher les grandeurs électriques aux unités absolues, on constituera le système d'unités électriques absolues appelé *système électrostatique*. Si l'on choisit la loi des actions électrodynamiques exprimée par la *formule d'Ampère*, on constituera le *système électrodynamique*. Enfin, si l'on choisit la loi des actions électromagnétiques exprimée par la *formule de Laplace*, on constituera le *système électromagnétique* des unités électriques absolues.

C'est ce dernier système qui fut proposé dès 1852 par l'Association Britannique pour l'avancement des sciences, qui fut adopté en 1865 par la Société Royale de Londres et qui a été précisé et définitivement consacré en 1881 par le Congrès des Électriciens.

1069. **Unités dérivées C. G. S. électriques et magnétiques.** — Ce système d'unités est défini par la formule de Laplace, laquelle rattache les grandeurs électriques et magnétiques aux grandeurs mécaniques.

1° *Unité de magnétisme.* — C'est la quantité de magnétisme qui exerce sur une quantité égale, placée à 1 centimètre, une force égale à une dyne.

Soit Q cette unité. On a, d'après la loi de Coulomb (en représentant par F et par L les unités absolues de force et de longueur),

$$F = \frac{Q^2}{L^2},$$

d'où l'on tire $Q = L\sqrt{F}$.

En remplaçant F par sa dimension, on aura $\sqrt{F} = \sqrt{\frac{ML}{T^2}} = \frac{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}}{T}$

$$Q = \frac{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}}}{T}.$$

Telle est la *dimension* de l'unité de magnétisme.

2° *Unité de champ magnétique.* — C'est le champ magnétique dans lequel l'unité de magnétisme subit une attraction ou une répulsion égale à une dyne.

Soit H cette unité. On a, d'après la loi de Coulomb, $F = HQ$, d'où l'on tire

$$H = \frac{F}{Q}.$$

En remplaçant F et Q par leurs dimensions, on aura la dimension du champ magnétique. Elle est

$$H = \frac{M^{\frac{1}{2}}}{L^{\frac{1}{2}}}.$$

3° *Unité de moment magnétique.* — C'est le moment d'un aimant de longueur égale à 1 centimètre et dont les pôles renferment chacun l'unité de magnétisme. Soit J cette unité. On a par définition $J = QL$. En remplaçant Q et L par leurs dimensions, on a la dimension de J.

Elle est

$$J = \frac{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{5}{2}}}{T}.$$

4° *Unité de courant.* — C'est un courant d'intensité telle, qu'une longueur de 1 centimètre de ce courant, décrivant un cercle de rayon égal à 1 centimètre, exerce au centre de ce cercle, sur l'unité de magnétisme, une force égale à une dyne.

Soit I la dimension, on a

$$I = \frac{F}{HL} = \frac{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}}{T}.$$

5° *Unité d'électricité.* — C'est la quantité d'électricité qui traverse en 1 seconde la section d'un conducteur parcouru par l'unité de courant.

Dimension $= A = IT = M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}$.

6° *Unité de résistance.* — C'est celle d'un conducteur dans lequel l'unité de courant dépense (sous forme de chaleur) un erg dans 1 seconde.

Dimension $= R = \frac{W}{I^2 T} = \frac{L}{T}$. Il faut remarquer que *cette dimension est la même que celle de la vitesse.*

7° *Unité de force électromotrice ou de différence de potentiel.* — C'est celle qui communique l'unité d'énergie à l'unité d'électricité.

Dimension $= E = IR = \frac{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}}}{T^2}$.

8° *Unité de capacité.* — C'est celle d'un condensateur dont les armatures seraient chargées de l'unité d'électricité pour une différence de potentiel égale à l'unité.

Dimension $= C = \frac{A}{E} = \frac{T^2}{L}$.

1070. **Unités électromagnétiques secondaires.** — Plusieurs de ces unités absolues seraient d'un usage peu commode dans la pratique : elles seraient ou beaucoup trop grandes ou beaucoup trop petites par rapport aux grandeurs électriques qu'on est appelé ordinairement à mesurer. Aussi leur a-t-on substitué dans la pratique des unités secondaires qui en sont des multiples ou des sous-multiples[1].

1° *Unité secondaire d'intensité de courant.* — Elle est égale à $\frac{1}{10}$ d'unité absolue; on l'appelle *ampère*.

Un élément Daniell de taille moyenne, monté au sulfate de zinc, donne un courant de $1^{\text{amp}},3$ quand ses pôles sont réunis par une résistance extérieure négligeable.

Un galvanomètre à une seule aiguille, d'une sensibilité médiocre, peut être gradué en milliampères.

2° *Unité secondaire de quantité d'électricité.* — Elle est égale à $\frac{1}{10}$ d'unité absolue; on l'appelle *coulomb*.

1. Nous avons défini précédemment ces *unités pratiques*, à mesure que l'emploi en devenait nécessaire. Nous résumons ici, pour plus de clarté, ces définitions dans un même paragraphe.

D'après M. Mascart, l'unité absolue d'électricité est capable de décomposer $0^{mmg},9373$ d'eau en une seconde.

3° *Unité secondaire de résistance.* — Elle est égale à 10^9 unités absolues : on l'appelle *ohm*.

Nous avons vu que cette unité secondaire a été réalisée matériellement, c'est-à-dire qu'on a pu construire un *ohm-étalon*, comme on a construit un mètre-étalon.

Le Congrès des Électriciens ayant décidé qu'on établirait l'étalon de résistance en colonne de mercure à 0°, de section égale à 1^{mmq}, des expériences précises ont démontré que la longueur de cette colonne est exactement égale à 106^{cm}.

L'*ohm-étalon* qui avait été précédemment déterminé par l'Association Britannique, est trop faible : il diffère d'environ 0,010 de l'ohm théorique.

L'*unite de résistance Siemens* (qui n'est pas autre chose que l'ancienne unité de Pouillet) vaut environ 0,945 de l'ohm théorique.

Il faut de 48 à 50 mètres d'un fil de cuivre du commerce pour faire un ohm.

L'ancienne unité de résistance des télégraphes français, qui était d'un kilomètre de fil de fer de 4 millimètres de diamètre, vaut environ 10 ohms.

Un élément Bunsen de dimension moyenne a une résistance d'environ $0^{ohm},15$ et un élément Daniell de dimension moyenne une résistance de $0^{ohm},85$.

4° *Unité secondaire de force électromotrice ou de différence de potentiel.* — Elle est égale à 10^8 unités absolues : on l'appelle *volt*.

Un élément Volta ordinaire, formé de zinc, cuivre et sulfate de zinc, a une force électromotrice sensiblement égale à 1 volt.

Un élément Daniell formé de cuivre, sulfate de cuivre, sulfate de zinc et zinc amalgamé a une force électromotrice qui varie entre $1^v,09$ et $1^v,14$.

La force électromotrice de l'élément Latimer Clark, le plus constant des éléments voltaïques, a pour valeur $1^v,457$.

5° *Unité secondaire de capacité électrique.* — Elle est égale à $\frac{1}{10^9}$ d'unité absolue : on l'appelle *farad*.

D'après la formule fondamentale des condensateurs $Q = CV$, on voit qu'un condensateur de 1 farad se charge d'*un coulomb* sur chacune de ses armatures pour une différence de potentiel d'*un volt*.

Remarque. — L'unité absolue de capacité électromagnétique est énorme.

Le farad lui-même est une unité trop grande dans la pratique. On construit pour les mesures de capacité électriques des *condensateurs-étalons* donnant le microfarad et les sous-multiples du microfarad.

Une batterie électrique de dix jarres, ayant un développement en surface de 1^{mq} et un verre d'une épaisseur de 1 millimètre, a une capacité qui n'est que $\frac{1}{55}$ de microfarad.

CHAPITRE VII

EFFETS PHYSIQUES DES COURANTS.

AIMANTATION PAR LES COURANTS, ÉLECTRO-AIMANTS.

1071. **Aimantation par les courants.** — D'après l'influence que les courants exercent sur les aimants, il est naturel de pense

qu'ils agiront aussi sur les substances magnétiques de manière à les aimanter en orientant les courants d'Ampère. Arago découvrit, en effet, qu'en plongeant un fil de fer parcouru par un courant dans de la limaille de fer, celle-ci s'y attache abondamment, et qu'elle retombe aussitôt que le courant cesse, tandis que l'action est nulle sur la limaille de tout autre métal non magnétique.

L'action des courants sur les substances magnétiques est surtout sensible quand on emploie le procédé d'Ampère : on enroule en hélice un fil de cuivre recouvert de soie autour d'un tube de verre, et l'on place dans celui-ci un barreau d'acier non aimanté. On observe qu'il suffit qu'un courant traverse le fil, même instantanément, pour que le barreau soit fortement aimanté.

Si, au lieu d'un courant de pile, on fait passer dans le fil la décharge d'une bouteille de Leyde, on trouve encore que le barreau s'aimante. On peut donc aimanter également par l'électricité voltaïque et par l'électricité des machines.

1072. **Procédé d'aimantation.** — 1° *Cas de l'acier.* — On place en général le barreau d'acier dans l'axe d'un tube de verre sur lequel on enroule le fil conducteur du courant. L'enroulement du fil peut avoir lieu de gauche à droite en dessus, et alors on a une *hélice dextrorsum* (fig. 996) ; s'il se fait de gauche à droite en dessous, on a une *hélice sinistrorsum* (fig. 997). Dans la première, le

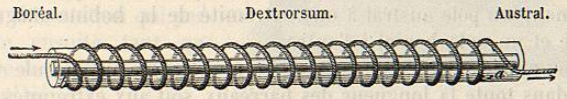

Fig. 996.

Fig 997.

pôle boréal du barreau est toujours à l'extrémité par laquelle entre le courant; c'est le contraire qui a lieu dans l'hélice sinistrorsum.

La nature du tube sur lequel s'enroule l'hélice n'est pas sans influence. Le bois et le verre sont sans effet; mais un cylindre de cuivre épais peut détruire complètement l'effet du courant. Il en est de même avec le fer, l'argent et l'étain. On verra que ce phénomène est dû à des courants dits *d'induction*, qui sont développés dans le métal sur lequel est enroulée l'hélice.