LIVRE IX

MAGNÉTISME

CHAPITRE PREMIER

PROPRIÉTÉS DES AIMANTS.

838. **Aimants naturels, aimants artificiels : définitions fondamentales.** — On nomme *aimants* des substances qui ont la propriété d'attirer le fer et quelques autres métaux, tels que le nickel, le cobalt, le manganèse et le chrome.

On distingue l'aimant naturel et les aimants artificiels. L'*aimant naturel*, ou *pierre d'aimant*, est un oxyde de fer désigné en chimie sous le nom d'*oxyde salin* ou d'*oxyde magnétique*, et représenté par la formule Fe^3O^4. C'est un minerai de fer, très abondant dans la nature ; on le rencontre dans les terrains anciens, principalement en Suède et en Norvège. Toutefois la plupart des échantillons d'oxyde de fer dit magnétique ne sont pas des aimants ; ce n'est qu'accidentellement qu'ils sont doués de la propriété magnétique.

Les *aimants artificiels* sont des barreaux, ou des aiguilles, d'acier trempé, qui possèdent les mêmes propriétés que les aimants naturels, non pas naturellement, mais parce qu'on les leur a communiquées par des procédés qui seront décrits plus tard.

Quelle que soit l'origine des aimants, qu'ils soient *naturels* ou *artificiels*, ils possèdent les mêmes propriétés générales. Leur pouvoir attractif s'exerce à toutes les distances et à travers tous les corps ; il décroît très vite quand la distance augmente, et varie avec la température. Il diminue à mesure qu'on élève la température du barreau aimanté, et reprend sa valeur initiale quand la température s'abaisse au degré primitif, *pourvu qu'on n'ait pas dépassé une certaine limite* (en effet, *à la température du rouge*, toute aimantation est complètement et définitivement anéantie).

Le pouvoir attractif des aimants est quelquefois appelé leur

force magnétique, et l'on désigne sous le nom *magnétisme* la cause inconnue de cette propriété. On appelle aussi *Magnétisme* la partie de la physique qui comprend l'étude des aimants[1].

839. **Pôles et ligne neutre. — Points conséquents.** — Les aimants ne possèdent pas en tous leurs points la même force magnétique. En effet, si l'on roule un bareau aimanté dans de la limaille de fer, on en voit une grande quantité adhérer vers les extrémités sous la forme de houppes hérissées (fig. 814) ; mais l'adhérence de la limaille décroît rapidement à mesure qu'on

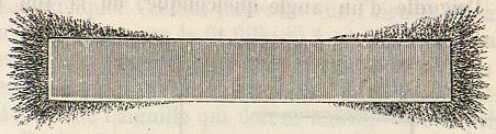

Fig. 814.

s'éloigne des extrémités, jusqu'à la partie médiane du barreau, où elle est nulle. La région de l'aimant où la force magnétique est insensible a reçu le nom de *ligne neutre*, et les deux régions voisines des extrémités, où se manifeste le maximum d'attraction, se nomment *pôles*.

Points conséquents. — Tout aimant, naturel ou artificiel, présente deux pôles et une ligne neutre; toutefois, dans l'aimantation des barreaux, il se produit parfois des pôles contraires alternés entre les pôles extrêmes. C'est ce qu'on appelle des *pôles secondaires* ou *points conséquents*. Tantôt ils sont en nombre pair, tantôt en nombre impair. Nous supposerons toujours que les aimants n'ont que deux pôles : c'est ce qui arrive ordinairement lorsqu'on a soumis aux procédés usuels d'aimantation des masses d'acier ayant la forme, soit de barreaux prismatiques, soit de tiges cylindriques.

840. **Aiguilles aimantées.** — On donne aussi fréquemment aux aimants la forme de lames minces, découpées en losanges très allongés : on les appelle alors *aiguilles aimantées* (fig. 815). Une aiguille aimantée est destinée à servir d'aimant mobile ; aussi porte-t-elle, en général, en son centre de gravité, une petite cavité garnie d'une chape, par où on peut la poser et la faire osciller sur un pivot vertical ou horizontal.

1. C'est là le magnétisme proprement dit, qui n'a rien de commun avec le *mesmérisme*, improprement appelé *magnétisme animal*.

841. **Distinction des pôles.** — Si l'on pose une aiguille aimantée sur un pivot vertical et qu'on l'abandonne à elle-même, on la voit, après une série d'oscillations, se fixer dans une position d'équilibre qui sera invariable, du moins pendant la durée de l'expérience. Si on l'écarte de cette position, elle y reviendra d'elle-même. On remarque, en outre, que c'est toujours la même extrémité de l'aiguille qui se dirige vers le même point de l'horizon. L'une se tourne sensiblement vers le pôle nord géographique, et l'autre vers le pôle sud. Si l'on marque la première d'un A et la seconde d'un B, de manière à les distinguer, on a beau faire tourner l'aiguille d'un angle quelconque, on la voit toujours

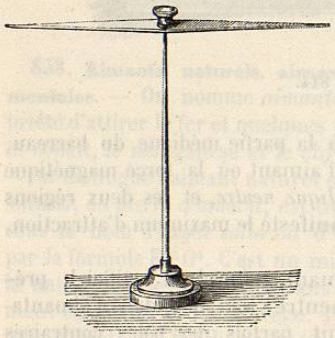

Fig. 815.

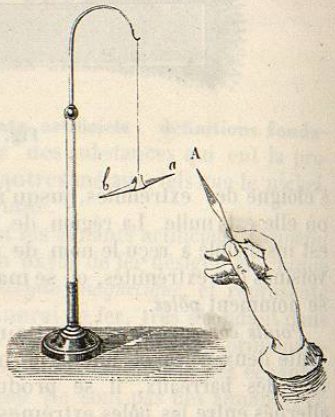

Fig. 816.

prendre la même position d'équilibre, A vers le nord, et B vers le sud.

Quelle que soit la cause de cette orientation constante, cette propriété suffit pour distinguer nettement les pôles l'un de l'autre. Dans les dessins, le premier pôle sera toujours représenté par les lettres A ou *a*, et le deuxième pôle par les lettres B ou *b*, et l'on appellera pôles *de même nom* ceux qui sont désignés par la même lettre dans des aiguilles différentes.

842. **Actions mutuelles des pôles.** — Les deux pôles d'un aimant paraissent identiques entre eux quand on les présente à la limaille de fer; mais cette identité n'est qu'apparente. En effet, qu'on suspende une aiguille aimantée *ab* (fig. 816) à un fil fin, et qu'on approche de son pôle *a* le pôle A d'une autre aiguille, on remarque une vive répulsion; qu'on approche, au contraire, le même pôle A

du pôle *b* de l'aiguille mobile, il se produit une forte attraction. Donc les pôles *a* et *b* ne sont pas identiques, puisque l'un est repoussé et l'autre attiré par le même pôle A de l'aimant fixe. On vérifie de même que les deux pôles de ce dernier diffèrent entre eux, en les présentant successivement au même pôle *a* de l'aiguille mobile. Avec l'un il y a répulsion, et attraction avec l'autre. On en conclut que les actions réciproques entre deux aimants sont soumises à cette loi :

Les pôles de même nom se repoussent, et les pôles de noms contraires s'attirent.

Si, pour expliquer l'action terrestre sur l'aiguille aimantée, on assimile la terre (comme le fit Gilbert) à un immense aimant dont les pôles magnétiques seraient situés respectivement dans le voisinage des pôles géographiques, en vertu de la loi précédente c'est le pôle Austral de l'aiguille qui doit se tourner vers le pôle Boréal ou pôle Nord terrestre, et, au contraire, le pôle Boréal de l'aiguille vers le pôle Austral ou pôle Sud terrestre. De là viennent les doubles noms (contradictoires en apparence) de pôle *nord* ou *austral* et de pôle *sud* ou *boréal*, qu'on donne habituellement aux deux pôles d'un aimant.

Dans les aiguilles aimantées le pôle austral est généralement coloré en *bleu* (par la trempe).

843. **Théorie du magnétisme.** — 1° *Hypothèse d'Ampère.* — Ampère a donné une théorie du magnétisme fondée sur les propriétés des courants électriques. Elle est exclusivement adoptée aujourd'hui qu'on renonce de toutes parts à l'ancienne hypothèse des fluides impondérables. Nous l'exposerons plus loin, après les phénomènes électriques dont elle est la conséquence.

2° *Hypothèse de deux fluides magnétiques.* — On a longtemps admis une autre hypothèse, dite des *fluides magnétiques :* elle n'a plus qu'un intérêt historique. On admettait deux fluides impondérables, agissant chacun par répulsion sur lui-même et par attraction sur l'autre; on désignait ces fluides sous les noms, l'un de *fluide austral*, l'autre de *fluide boréal*, d'après ceux des pôles d'aimants où leurs actions sont prépondérantes.

Expérience des aimants brisés. — L'expérience des *aimants brisés* démontre que les phénomènes magnétiques sont essentiellement moléculaires, c'est-à-dire que chaque particule d'un corps aimanté est un véritable aimant, ayant deux pôles. En effet, si l'on prend une aiguille d'acier *régulièrement aimantée* (c'est-à-dire ayant deux pôles séparés par une ligne neutre) et qu'on la brise en son milieu, chaque moitié d'aiguille est un aimant complet comme l'aiguille entière (fig. 817). Si l'on brise de même ces

nouveaux aimants en deux parties, on trouve encore que chacune d'elles est un aimant complet ; et ainsi de suite, aussi loin qu'on peut pousser la division.

On peut donc admettre qu'avant l'aimantation les deux fluides étaient réunis autour des particules des substances magnétiques, et se neutralisaient mutuellement, mais que, sous l'influence d'une force capable de surmonter leur attraction réciproque, ils sont

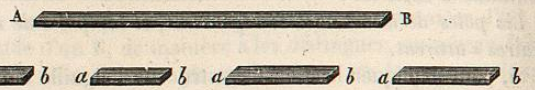

Fig. 817.

séparés, puis orientés autour des particules métalliques, le fluide boréal dans une direction, le fluide austral dans la direction opposée : il y a alors *aimantation*, et elle est plus ou moins forte, suivant que la séparation des fluides est plus ou moins complète. Elle persiste tant que dure la séparation des fluides et cesse en même temps que celle-ci.

Remarque. — Cette hypothèse fut imaginée par Coulomb, puis soutenue par Poisson. Weber l'a modifiée en admettant que la séparation des fluides préexiste dans les substances magnétiques, et qu'elles sont constituées par des particules aimantées, ayant chacune deux pôles, mais dirigées confusément dans tous les sens : l'aimantation résulterait alors de l'orientation dans une même direction d'un certain nombre de ces particules. Cette dernière théorie paraît plus conforme aux faits et s'accorde mieux avec celle d'Ampère.

844. **Force coercitive.** — On nomme *force coercitive* la force plus ou moins intense qui s'oppose soit à l'orientation des fluides dans une substance magnétique, soit au retour à leur confusion primitive et à leur désaimantation. Cette force paraît être nulle dans le fer doux, puisque ce métal s'aimante instantanément par l'influence d'un aimant. Dans l'acier trempé, cette force est grande, et l'est d'autant plus que la trempe est plus forte. En effet, mis en contact avec un aimant, un barreau d'acier ne s'aimante que lentement ; il est même nécessaire de le frictionner avec l'un des pôles de l'aimant, si l'on veut lui faire acquérir toute sa force. L'orientation des fluides magnétiques semble donc éprouver ici une résistance qui ne se rencontre pas dans le fer doux. Il en est de même du retour à leur confusion primitive ; car un barreau d'acier, une fois aimanté, ne perd que difficilement ses propriétés magnétiques. On verra bientôt que par l'oxydation, la pression ou la torsion le fer doux peut acquérir une certaine force coercitive, mais qui est de peu de durée.

845. **Distinction des substances magnétiques et des aimants.** — On nomme *substances magnétiques* les substances qui sont attirées par l'aimant, comme le fer, l'acier, le nickel. Elles contiennent des particules magnétiques, qui sont orientées confusément dans toutes les directions, de manière que la somme de leurs actions sur un point extérieur est nulle. Les composés ferrugineux sont généralement magnétiques, et ils le sont d'autant plus qu'ils contiennent plus de fer. Quelques-uns cependant, comme le persulfure de fer, ne sont pas attirés par l'aimant.

Les substances magnétiques privées de force coercitive, comme le fer doux, le nickel pur, ne sont plus attirables à l'aimant lorsqu'elles sont portées à une haute température. Le fer cesse d'être magnétique vers 600°, et le nickel vers 350°.

Il est facile de distinguer une substance magnétique d'un aimant : la substance magnétique *n'a pas de pôles ;* présentée successivement aux deux extrémités d'une aiguille aimantée (mobile sur un pivot vertical), telle que *ab* (fig. 816), elle les attire également toutes les deux, tandis qu'un pôle d'aimant attirerait l'une et repousserait l'autre.

846. **Aimantation par influence. — Fantômes magnétiques.** — Lorsqu'une substance magnétique est mise en contact avec un barreau aimanté, ses particules magnétiques s'orientent toutes dans le même sens, et la substance devient, tant que l'orientation persiste, un aimant complet, ayant deux pôles et une ligne neutre. Par exemple, si l'on fait porter par l'un des pôles d'un aimant un petit cylindre de fer doux *ab* (fig. 818), ce cylindre peut, à son

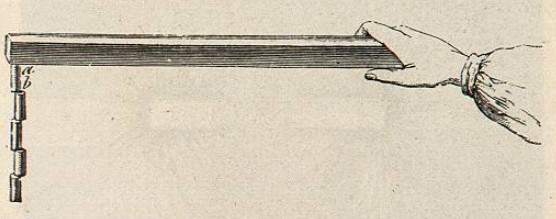

Fig. 818.

tour, porter un second cylindre semblable, puis celui-ci un troisième, et ainsi de suite, jusqu'à sept ou huit, suivant la force du barreau. Chacun des cylindres est donc devenu un aimant et reste un aimant aussi longtemps que dure l'influence ; mais dès que cette influence cesse par l'interruption du contact avec le premier cylindre, aussitôt les autres cylindres se détachent et ne

conservent aucune trace de magnétisme. L'orientation des fluides n'a donc été que momentanée.

L'aimantation par influence explique la formation des houppes de limaille qui s'attachent aux pôles des aimants (fig. 814). Les parcelles qui sont en contact avec l'aimant deviennent autant de petits aimants et agissent par influence sur les parcelles voisines; celles-ci agissent de même sur les suivantes, et ainsi de suite jusqu'à une certaine distance où l'influence finit par s'annuler.

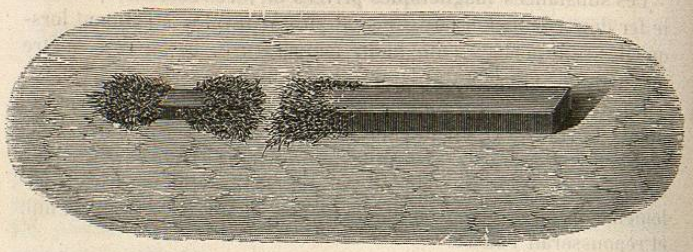

Fig. 819.

L'aimantation par influence ne se produit pas seulement au contact; elle se produit aussi à distance, mais avec d'autant plus

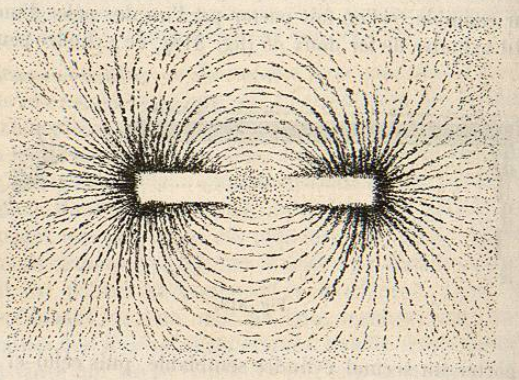

Fig. 820.

d'énergie que cette distance est plus faible et que le barreau aimanté est plus fort. La figure 819 montre une expérience d'influence à distance.

C'est par le même effet que se produisent les *fantômes* ou *spectres magnétiques*. On nomme ainsi la disposition en courbes symétriques que prend la limaille de fer sous l'influence d'un barreau aimanté (fig. 820). On obtient ces courbes en appliquant sur un

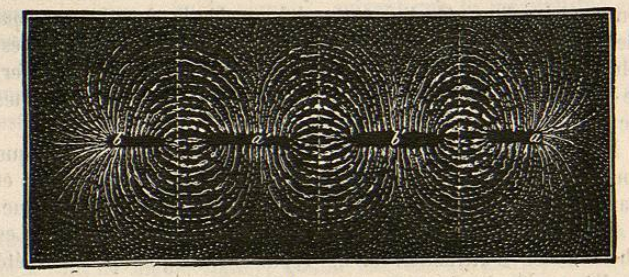

Fig. 821.

barreau horizontal un carton mince que l'on saupoudre, à l'aide d'un petit tamis, d'une couche de limaille de fer. Celle-ci se dispose spontanément, sous l'influence des pôles de l'aimant, en courbes régulières, allant d'un pôle à l'autre et changeant de direction aux extrémités du barreau.

Dans le cas où le barreau aimanté a des points conséquents, le spectre magnétique a la forme représentée par la fig. 821.

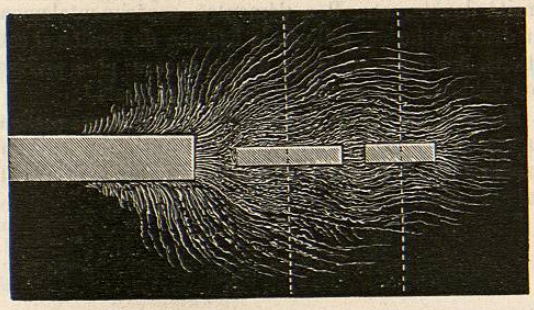

Fig. 822

On peut obtenir également des spectres magnétiques par influence, comme l'indique la figure 822.

847. **Lignes de force** et **Champ magnétique.** — Ce sont ces courbes magnétiques qui donnèrent à Faraday l'idée des *lignes*

de force. Il appela ainsi les lignes suivant lesquelles s'exercent les attractions et les répulsions magnétiques (et électriques). Elles sont parfaitement déterminées, pour l'attraction de la limaille, dans les fantômes magnétiques (fig. 820, 821 et 822).

La portion de l'espace dans laquelle s'exerce l'action attractive ou répulsive d'un pôle d'aimant, a été appelée le *champ magnétique* de ce pôle. Elle est plus ou moins étendue, suivant que le pôle est plus ou moins fort. Dans le cas de l'attraction de la limaille de fer, le champ magnétique est déterminé par l'ensemble des lignes de force.

Les considérations de lignes de force et de champ magnétique (ou électrique) ont pris une grande importance dans le langage et dans les théories de la nouvelle science électrique et magnétique.

848. **Lois des attractions et des répulsions magnétiques.** — Les phénomènes d'attraction et de répulsion magnétiques ont été étudiés par Coulomb et il a trouvé deux lois, qu'on peut réunir dans l'énoncé suivant :

Deux pôles magnétiques s'attirent (ou se repoussent) en raison inverse du carré de leur distance et en raison directe du produit de leurs masses magnétiques.

Coulomb définissait l'intensité d'un pôle magnétique par l'action du magnétisme terrestre. Deux pôles avaient la même intensité ou la même masse magnétique quand ils éprouvaient des actions égales de la part de la terre; deux pôles de même masse magnétique constituaient, par leur assemblage, un pôle de masse ou d'intensité double, etc. Il a démontré expérimentalement ces lois par deux méthodes, celle de la balance de torsion et celle des oscillations. Des expériences de Gauss, encore plus précises que celles de Coulomb, ont confirmé tous ces résultats [1].

849. **Formule des lois de Coulomb. — Unité de magnétisme.** — Il résulte des lois précédentes que l'attraction, ou la répulsion, qui s'exerce entre deux pôles d'aimant de masses μ et μ', situés à une distance d, est représentée par la formule

$$F = k\,\frac{\mu\mu'}{d^2},$$

k étant une constante qui représente l'action réciproque de deux masses magnétiques égales à 1 situées à la distance 1. La valeur de k dépendra du choix des unités de force et de magnétisme.

1. Nous ne décrirons pas ici ces expériences, qui dépassent les limites de notre programme. Nous reviendrons d'ailleurs sur la balance de Coulomb, à propos des attractions et des répulsions électriques.

Or on appelle *unité de magnétisme* ou *unité de masse magnétique* (dans le système C.G.S) la quantité de magnétisme qu'il faut supposer concentrée en un pôle d'aimant pour que l'action exercée, à la distance de *un centimètre* sur une masse identique, soit égale à une *dyne* (c'est-à-dire à l'unité de force C.G.S). On donne à la masse le signe + ou le signe —, suivant que le magnétisme est austral ou boréal.

Cette unité étant ainsi définie, la force qui s'exerce entre deux masses μ et μ' concentrées en deux pôles situés à une distance d, est exprimée (en *dynes*) par la formule

$$F = \pm\,\frac{\mu\mu'}{d^2}.$$

Quand la force F est répulsive, sa valeur est positive (car alors μ et μ' sont de même signe); quand elle est attractive, elle a le signe — (car μ et μ' sont des signes contraires).

850. **Intensité d'un champ magnétique.** — Un pôle d'aimant, placé dans un champ magnétique, y subit une attraction ou une répulsion, qui dépend à la fois de la masse magnétique de ce pôle et de l'*intensité du champ.*

On appelle *intensité d'un champ magnétique*, en un point, la grandeur de la force qui agirait en ce point sur l'unité de magnétisme.

Soit h l'intensité d'un champ en un point, la force F qui agit en ce point sur un pôle magnétique de masse μ est donnée par l'équation de Coulomb. On a

$$F = \mu h.$$

851. **Champ magnétique terrestre.** — On appelle *champ magnétique uniforme* un champ où la force magnétique exercée, en chaque point, sur l'unité du magnétisme, est *constante* en grandeur et en direction.

Lorsque la force exercée en chaque point du champ sur l'unité de magnétisme est égale à une dyne (c'est-à-dire à l'unité de force C.G.S), on a un champ égal à l'*unité de champ magnétique.*

Le magnétisme terrestre produit, dans un espace limité, un champ magnétique sensiblement uniforme.

Il est vrai que la direction et l'intensité de la force magnétique terrestre varient, aux différents points de la surface du globe, de même que la pesanteur ; mais on peut la considérer comme *constante*, dans les mêmes limites et pour les mêmes raisons que cette dernière force.

Soit F l'intensité de l'action du magnétisme terrestre sur un pôle d'aimant ; soit μ la masse magnétique concentrée en ce pôle et H l'intensité du champ magnétique terrestre dans le lieu considéré, on aura

$$F = H\mu.$$

852. **Moment magnétique d'un barreau aimanté.** — Lorsqu'un barreau, régulièrement aimanté (c'est-à-dire n'ayant que deux pôles et une seule *ligne neutre*), se trouve dans un champ magnétique uniforme, il est soumis à deux forces égales et contraires appliquées en ses deux pôles et formant un couple. Si h est l'intensité du champ et μ la masse magnétique de chaque pôle, chaque force F est égale à μh.

Si l'aimant est placé normalement à la direction du couple, celui-ci tendra à le faire tourner, de manière à l'amener dans sa propre direction. Le moment du couple de rotation sera $M = 2lF$, en appelant $2l$ la longueur de l'aiguille. En remplaçant F par sa valeur, on aura

$$M = 2l\mu h.$$

Le produit $2l\mu$ est appelé *moment magnétique absolu* du barreau aimanté.

853. **Potentiel magnétique.** — Les attractions et les répulsions magnétiques étant définies par la loi du carré des distances, on peut appliquer au magnétisme la théorie du potentiel. Comme nous développerons cette théorie à propos des actions électriques, nous nous bornerons ici à la définition.

On appelle *potentiel magnétique* en un point quelconque (où l'on suppose concentrée l'unité du magnétisme austral), la somme

$$\frac{\mu_1}{r_1} + \frac{\mu_2}{r_2} + \ldots = \Sigma\left(\frac{\mu}{r}\right) = V,$$

dans laquelle $\mu_1, \mu_2 \ldots$, sont les masses magnétiques, australes ou boréales, disséminées dans le champ magnétique, et $r_1, r_2 \ldots$ les distances respectives du point à ces différentes masses.

Toutes les propriétés que nous démontrerons plus loin pour le potentiel électrique s'appliquent au potentiel magnétique.

854. **Action des aimants sur tous les corps. — Substances diamagnétiques.** — Dès 1802, Coulomb observa que les aimants agissent avec plus ou moins de force sur tous les corps. Il constata ce fait en faisant osciller de petits barreaux de différentes substances d'abord entre les pôles opposés de deux forts barreaux aimantés, puis loin de l'influence de tout aimant. La comparaison des nombres d'oscillations exécutés, dans les deux cas, en des temps égaux, mettait en évidence l'action magnétique.

On attribua d'abord ce phénomène à la présence de matières ferrugineuses dans les corps soumis à l'expérience ; mais Lebaillif, Faraday et Becquerel ont démontré que les aimants exercent réellement une action sur tous les corps, même sur les gaz.

On a constaté de plus que cette action est tantôt attractive et tantôt répulsive : les corps attirés ont reçu le nom de *corps magnétiques*, et ceux qui sont repoussés celui de *substances diamagnétiques*. Parmi ces derniers sont le bismuth, le plomb, le soufre, la cire, l'eau, etc. Le cuivre est tantôt magnétique, tantôt diamagnétique, ce qui tient probablement à son degré de pureté.

Faraday, en 1847, avait reconnu que les aimants puissants exercent sur les flammes une action répulsive, qu'il a attribuée à une différence de diamagnétisme entre les gaz. Depuis, M. Ed. Becquerel a constaté que, de tous les gaz, c'est l'oxygène qui a la plus grande puissance magnétique, et qu'un mètre cube de ce gaz condensé agirait sur une aiguille aimantée comme $5^{gr},5$ de fer.

On a calculé que, le pouvoir magnétique du fer étant représenté par 100 000, celui de l'oxygène, *à poids égal*, est 377 et celui de l'air 88. On en conclut que l'atmosphère tout entière agit, au point de vue magnétique, comme une couche de fer, de $0^{mm},1$ d'épaisseur, qui enveloppait complètement notre globe.

CHAPITRE II

MAGNÉTISME TERRESTRE.

BOUSSOLES DE DÉCLINAISON ET D'INCLINAISON.

855. **Action de la terre sur les aimants. — Couple terrestre. —** Lorsqu'on suspend une aiguille aimantée à un fil, comme le représente la figure 816, ou lorsqu'on la pose sur un pivot autour duquel elle peut librement tourner (fig. 823), nous avons dit que l'aiguille, au lieu de s'arrêter dans une position quelconque, finit toujours par se fixer dans une direction voisine de la ligne nord-sud.

Fig. 823.

Nous avons conclu de cette expérience que la terre exerce sur les aimants une action à distance, analogue à celle de la pesanteur. Nous nous sommes servis de cette action pour distinguer et définir expérimentalement les deux pôles d'un aimant ; nous allons maintenant l'étudier.

Rappelons d'abord que lorsqu'un corps solide est soumis à l'action d'un système de forces quelconques, celles-ci peuvent se réduire, dans le cas le plus général, au système plus simple d'un couple et d'une force unique (53). Le couple tend à faire tourner le corps, tandis que la force tend à lui imprimer, en même temps, un mouvement de translation. Le système des forces magnétiques provenant de l'action terrestre sur une aiguille aimantée est-il un système *quelconque*, réductible à un couple plus une force ? C'est ce que l'expérience va nous apprendre.

1° *La force magnétique terrestre n'a pas de composante verticale.* — On a constaté à l'aide de pesées très précises qu'un barreau d'acier ne pèse pas plus *après* qu'*avant* l'aimantation. Donc *la force terrestre*, si elle existe, *n'a pas de composante verticale.*

2° *La force magnétique terrestre n'a pas de composante horizon-*