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-*

tale. — Si, dans un vase plein d'eau, on pose un disque de liège, et sur celui-ci un barreau aimanté, le liège oscille d'abord, puis se fixe dans une position telle, que la ligne des pôles de l'aimant soit plus ou moins parallèle à la direction du nord au sud (fig. 824). Mais, dans cette expérience comme dans la précédente, le liège

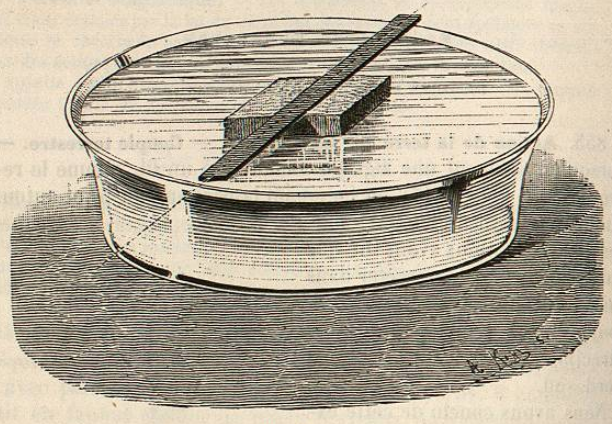

Fig. 824

et le barreau n'avancent ni vers le nord ni vers le sud. Donc *la force terrestre*, si elle existe, *n'a pas de composante horizontale.*

3° *La force magnétique terrestre se réduit à un couple.* — Puisque la force magnétique terrestre n'a ni composante verticale ni composante horizontale, on doit en conclure qu'elle est nulle : donc le système de forces magnétiques terrestres *se réduit à un couple.* C'est ce qu'on appelle le *couple terrestre.*

L'existence du couple terrestre est donc un fait expérimental, indépendant de toute hypothèse sur l'origine du magnétisme terrestre, Le couple terrestre sera complètement défini quand on connaîtra : 1° sa direction en un lieu donné de la terre ; 2° le moment de l'action qu'il exerce sur un aimant donné. Nous allons déterminer d'abord sa direction ; nous déterminerons plus tard son moment, quand nous saurons mesurer les forces magnétiques.

856. **Direction du couple terrestre. — Méridien magnétique. — Déclinaison et Inclinaison.** — On sait que le *méridien astronomique* en un point de la surface du globe est le plan qui passe par ce point et par les deux pôles terrestres, et que la *méridienne géographique* est la trace de ce plan sur la surface du globe. De

même, on appelle *méridien magnétique* d'un lieu donné le plan vertical qui passe en ce lieu par la direction du couple terrestre. Nous démontrerons plus loin que le méridien magnétique coïncide avec le plan vertical mené par la direction d'équilibre de la ligne des pôles d'une aiguille de *déclinaison*, c'est-à-dire d'une aiguille aimantée, mobile sur un axe vertical. On se sert souvent de cette propriété pour définir le méridien magnétique. Cette direction d'équilibre de l'aiguille aimantée est elle-même la *méridienne magnétique*, car elle est la trace du méridien magnétique sur l'horizon géographique.

Le méridien magnétique ne coïncide pas, en général, avec le méridien astronomique d'un lieu. On nomme *déclinaison magnétique* en un lieu l'angle du méridien magnétique avec le méridien astronomique, ou, ce qui revient au même, l'angle que fait l'aiguille de déclinaison avec la méridienne géographique. La déclinaison est *orientale* ou *occidentale*, selon que le pôle austral de l'aiguille se place à l'est ou à l'ouest du méridien astronomique.

On appelle *inclinaison magnétique* l'angle que fait la direction du couple terrestre avec l'horizontale du lieu. On mesure l'inclinaison par l'angle que la moitié australe (la pointe *bleue*) d'une *aiguille d'inclinaison* (c'est-à-dire une aiguille aimantée mobile autour d'un axe horizontal) fait avec l'horizontale de son centre de suspension, lorsque le plan vertical où se meut l'aiguille coïncide avec le méridien magnétique.

857. **Mesure de la déclinaison et de l'inclinaison.** — Une aiguille aimantée, qui serait suspendue par son centre de gravité de manière à se mouvoir *librement* dans l'espace, se mettrait spontanément en équilibre dans la direction qu'a le couple terrestre au lieu de l'expérience. De cette position d'équilibre on déduirait immédiatement : 1° la position du méridien magnétique ; 2° la déclinaison ; 3° l'inclinaison.

Mais une pareille suspension n'est pas réalisable. Une aiguille aimantée est nécessairement assujettie à l'axe autour duquel elle se meut, et elle n'est mobile que dans le plan perpendiculaire à cet axe. Si celui-ci est vertical, l'aiguille se meut dans un plan horizontal : c'est une *aiguille de déclinaison ;* si l'axe est horizontal, l'aiguille se meut dans un plan vertical : c'est une *aiguille d'inclinaison.* Dans le premier cas, la position d'équilibre donne la direction de la composante horizontale du couple terrestre ; dans le deuxième cas, la position d'équilibre correspond non pas au couple terrestre lui-même, mais à sa composante dans le plan vertical de l'aiguille d'inclinaison.

858. **Principe des méthodes de mesure : Décomposition du couple terrestre.** — Toutes les méthodes de mesure de l'inclinaison et de la déclinaison magnétique sont fondées sur la décomposition mécanique des forces du couple terrestre.

Soit A l'un des pôles d'une aiguille aimantée que nous supposerons *libremen suspendue*. Cette aiguille se met spontanément en équilibre (fig. 825) dans la direction du couple terrestre. Soit AF l'une des forces du couple; l'angle FAN, que fait la direction AF avec sa projection sur le plan horizontal xAy, est, par définition, l'inclinaison I; et le plan vertical zNS, qui passe par la direction AF, est le méridien magnétique.

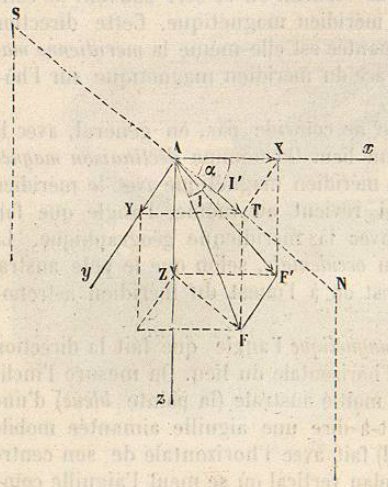

Fig. 825.

Décomposons la force F suivant trois directions rectangulaires quelconques (par la règle du parallélépipède). Soient d'abord les deux composantes T et Z dans le plan du méridien : elles ont évidemment pour valeur

$$T = F \cos I,$$
$$Z = F \sin I.$$

Décomposons maintenant la composante horizontale T dans son plan, on aura, en appelant α l'azimut du plan des xz,

$$X = T \cos \alpha = F \cos I \cos \alpha,$$
$$Y = T \sin \alpha = F \cos I \sin \alpha.$$

De là résultent immédiatement les conséquences suivantes :

1° Si l'aiguille n'est mobile que dans un plan horizontal (aiguille de déclinaison), chacun de ses pôles sera soumis à une force égale à T. Elle restera ainsi en équilibre, lorsqu'elle sera dans la direction du couple (T, — T), c'est-à-dire suivant la trace du méridien magnétique. On voit pourquoi *l'aiguille de déclinaison sert à déterminer le méridien magnétique.*

2° Si l'aiguille est mobile dans un plan vertical (aiguille d'inclinaison), son angle avec l'horizontale ne mesurera l'inclinaison I qu'autant que son azimut coïncidera avec le méridien magnétique.

Dans tout autre azimut, chaque pôle sera soumis à deux forces X et Z ou à leur résultante F'; elle sera donc en équilibre dans la direction du couple (F', — F'), qui est différent du couple terrestre. L'angle qu'elle fera avec l'horizon dans cette position d'équilibre sera un angle I', différent de I, mais lié à I par une relation facile à établir. En effet, I' est l'angle F'AX que fait la résultante partielle F' avec la composante X. Or on a

$$[1] \qquad \operatorname{tang} I' = \frac{Z}{X} = \frac{F \sin I}{F \cos I \cos \alpha} = \frac{\operatorname{tang} I}{\cos \alpha}.$$

Il est quelquefois commode de considérer la cotangente au lieu de la tangente. On sait qu'elle est égale à l'inverse de la tangente. On a donc

$$[2] \qquad \cot I' = \frac{1}{\operatorname{tang} I} \cos \alpha = \cot I \cos \alpha.$$

859. **Boussole de déclinaison.** — La déclinaison magnétique en un lieu donné se mesure au moyen d'instruments spéciaux, appelés *boussoles de déclinaison*.

Description. — La boussole de déclinaison *ordinaire* se compose d'une boîte de cuivre rouge AB (fig. 826) au centre de laquelle est

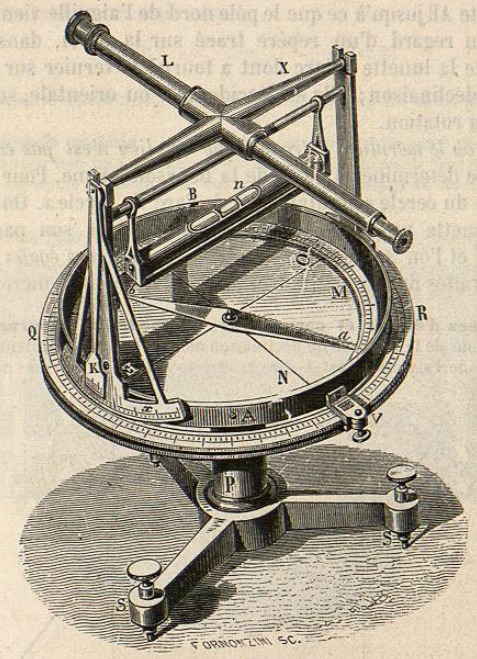

Fig. 826.

une aiguille aimantée *ab*, mobile sur un pivot. A la paroi de la boîte sont appliqués deux montants qui supportent un axe horizontal X, sur lequel est fixée une lunette astronomique L, mobile dans un plan vertical. La boîte AB est soutenue par un pied P sur lequel elle tourne librement dans le sens horizontal, entraînant la lunette dans son mouvement. Un cercle fixe QR, qu'on nomme

cercle azimutal, sert à mesurer au moyen d'un vernier V fixé à la boîte le nombre de degrés dont la lunette a tourné. Enfin l'inclinaison de la lunette par rapport à l'horizon se mesure par un vernier K, qui reçoit son mouvement de l'axe de la lunette, et se déplace sur un arc de cercle gradué et fixe x.

Opération. — I. *Cas où le méridien astronomique du lieu est connu.* — On commence par disposer la boussole bien horizontalement, au moyen de vis calantes S, S, et d'un niveau n; puis on amène la lunette dans le plan du méridien astronomique, et on note la position du vernier sur le limbe QR. On fait ensuite tourner la boîte AB jusqu'à ce que le pôle nord de l'aiguille vienne exactement en regard d'un repère tracé sur la paroi, dans le plan vertical de la lunette : l'arc dont a tourné le vernier sur le limbe donne la déclinaison; elle est occidentale ou orientale, suivant le sens de la rotation.

II. *Cas où le méridien astronomique du lieu n'est pas connu.* — On peut le déterminer à l'aide de la boussole même. Pour cela, on fait usage du cercle azimutal QR et de l'arc de cercle x. On observe avec la lunette un astre connu, avant et après son passage au méridien, et l'on applique la *méthode des hauteurs égales* décrites dans les traités de cosmographie, pour déterminer la méridienne[1].

860. **Causes d'erreur et corrections : Méthode du retournement.** — Les indications de la boussole de déclinaison ne sont exactes qu'autant que l'axe magnétique de l'aiguille, c'est-à-dire la droite qui passe par ses deux pôles,

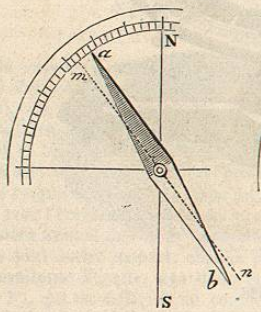

Fig. 827.

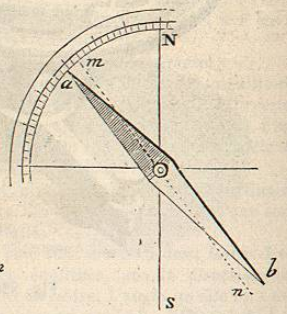

Fig. 828.

coïncide avec l'axe de figure, c'est-à-dire avec la droite qui joint ses deux extrémités. En général, cette condition n'est pas satisfaite. On corrige cette cause d'erreur par la méthode du retournement.

L'aiguille étant simplement posée, mais non fixée sur sa chape, on peut

1. Voir la *Cosmographie élémentaire* de M. Audoynaud.

l'enlever et, après l'avoir retournée, la remettre en place. On fait alors une deuxième observation de la déclinaison et la moyenne des deux résultats est égale à la déclinaison vraie. En effet, le diamètre NS étant orienté suivant le méridien astronomique, soient ab la direction de l'axe de figure de l'aiguille et mn celle de son axe magnétique (fig. 827). La véritable déclinaison n'est pas mesurée actuellement par l'arc Na, mais par l'arc Nm, qui est plus grand. Si l'on retourne l'aiguille, la ligne mn fait toujours le même angle avec le méridien NS; mais l'extrémité nord de l'aiguille, qui était à droite de mn, passe à gauche (fig. 828), en sorte que la déclinaison, qui était trop petite de l'arc am, devient trop grande précisément du même arc am. On avait dans la première expérience

$$aN = D - am,$$

et l'on a dans la deuxième expérience

$$aN = D + am, \quad \text{d'où} \quad \frac{aN + aN}{2} = D;$$

la déclinaison vraie est donc *la moyenne arithmétique des deux déclinaisons observées.*

861. **Boussole marine.** — L'action directrice de la terre sur l'aiguille aimantée a reçu une importante application dans la *boussole marine*, connue aussi sous les noms de *compas de variation* et de *compas de mer*. C'est une

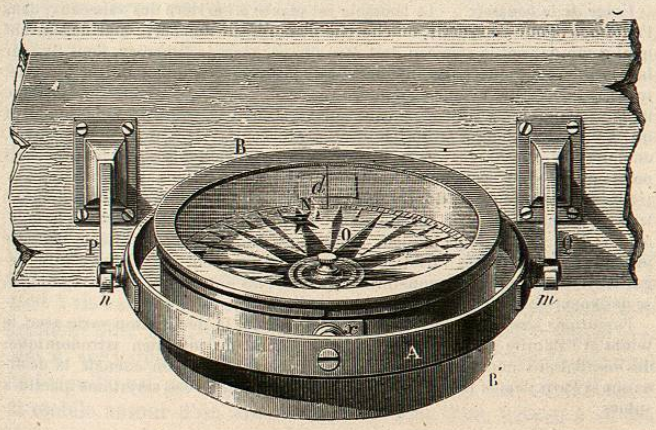

Fig. 829.

boussole de déclinaison dont on se sert sur mer pour diriger la marche des navires[1]. La figure 829 en donne une vue d'ensemble et la figure 830 une coupe verticale.

1. On ne connaît point l'inventeur de la boussole, ni l'époque précise de son invention. Guyot de Provins, poète français du XIIe siècle, parle le premier de l'usage de l'aimant pour la navigation. Les anciens navigateurs, qui ne connaissaient pas la boussole, n'avaient d'autres guides que le soleil ou l'étoile polaire; aussi étaient-ils obligés de naviguer constamment en vue des côtes.

Description de l'instrument. — La boussole consiste en une boîte cylindrique de cuivre BB', lestée à la partie inférieure par une masse de plomb, et suspendue à la Cardan ; elle conserve ainsi la position horizontale malgré le roulis et le tangage du navire. Au fond de la boîte est fixé un pivot vertical sur lequel un barreau aimanté *ab* est posé sur une chape (fig. 830) : c'est l'*aiguille* de la boussole. Elle porte un disque de mica, d'un diamètre un peu plus grand, sur

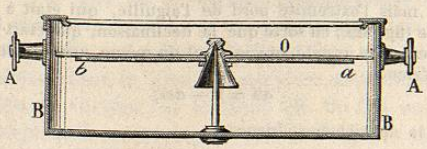

Fig. 830.

lequel est collé un autre disque de papier O, où est tracée la *rose des vents*. On appelle ainsi une étoile à 32 branches, comprenant les 8 rumbs de vents, les demi-rumbs et les quarts de rumb. L'une des branches est terminée par une petite étoile et désignée par N; elle correspond au barreau *ab* qui est sous le disque, et marque le méridien magnétique.

Usage de la boussole. — La boussole est placée à l'arrière des vaisseaux, dans l'*habitacle*. Pour s'en servir, on cherche d'abord, sur une carte marine, suivant quel rumb de vent le vaisseau doit être dirigé. Alors le timonier, l'œil fixé sur la boussole, tourne la barre du gouvernail jusqu'à ce que le rumb déterminé, marqué sur la rose, vienne coïncider avec la *ligne de foi :* on appelle ainsi une ligne passant par un trait *d* marqué sur la paroi intérieure de la boîte BB', et dirigée parallèlement à la quille du vaisseau. Toutefois, dans cette manœuvre, on doit tenir compte des variations qu'éprouve la déclinaison sur les différents points du globe et corriger continuellement les indications de la boussole.

862. **Variations de la déclinaison.** — La déclinaison de l'aiguille aimantée, très variable d'un lieu à un autre, est *occidentale* en Europe et en Afrique, *orientale* en Asie et dans les deux Amériques. De plus, dans un même lieu elle présente de nombreuses variations : les unes, qu'on peut considérer comme régulières, sont séculaires, annuelles ou diurnes; les autres, qui sont irrégulières, se désignent sous le nom de *perturbations*.

Variations séculaires. — Pour un même lieu, la déclinaison varie avec le temps et l'aiguille paraît faire, à l'est et à l'ouest du méridien astronomique, des oscillations dont la durée est de plusieurs siècles. On connaît la déclinaison à Paris depuis 1580. Le tableau suivant indique les variations qu'elle a subies :

Années.	Déclinaison.	Années.	Déclinaison.
1580.	11°30' à l'est.	1825.	22°13' à l'ouest.
1666.	0	1835.	22 4 —
1700.	8 12 à l'ouest.	1850.	20 31 —
1780.	20 35 —	1860.	19 22 —
1790.	22 00 —	1875 (juin). . .	17 31 —
1814.	22 34 —	1878 (septemb.).	17 00 —

On voit que de 1580 à 1814 la déclinaison a varié à Paris de plus de 34°, et que le maximum de déviation occidentale a eu lieu en 1814; depuis cette époque, l'aiguille revient vers l'orient.

Variations annuelles. — Les variations annuelles ont été signalées par Cassini, qui a observé, en 1784, que, de l'équinoxe du printemps au solstice d'été, l'aiguille, à Paris, rétrogradait vers l'est, et qu'au contraire elle avançait vers l'ouest dans les neuf mois suivants. Le maximum de variation observé pendant la même année a été de 20 minutes. Du reste, les variations annuelles sont fort peu connues et ne paraissent pas constantes.

Variations diurnes. — Outre les variations séculaires et annuelles, la déclinaison éprouve des variations diurnes, qui sont très faibles et qu'on ne peut observer que sur de longues aiguilles et à l'aide d'instruments très sensibles. Dans nos climats, l'extrémité nord de l'aiguille marche tous les jours de l'est à l'ouest depuis le lever du soleil jusque vers 1 heure après midi. Elle retourne ensuite vers l'est par un mouvement rétrograde, de manière à reprendre, à très peu près, vers 10 heures du soir la position qu'elle occupait le matin. La nuit, l'aiguille ne présente que peu de variations, mais subit cependant de nouveau un très faible déplacement vers l'ouest.

A Paris, l'amplitude moyenne de la variation diurne est, pour avril, mai, juin, juillet, août et septembre, de 13 à 15 minutes, et, pour les autres mois, de 8 à 10 minutes. Il y a des jours où elle s'élève à 25 minutes, et d'autres où elle ne dépasse pas 5 minutes. Le maximum de déviation n'a pas lieu partout à la même heure. L'amplitude des variations diurnes décroît des pôles vers l'équateur, où elle est très faible. Près de l'équateur, il existe une ligne sans variation diurne.

Perturbations. — La déclinaison de l'aiguille aimantée est troublée dans ses variations diurnes par plusieurs causes, telles que les aurores boréales, les éruptions volcaniques, la chute de la foudre. L'effet des aurores boréales se fait sentir à de grandes distances. Des aurores qui ne sont visibles que dans le nord de l'Europe, agissent encore sur l'aiguille à Paris, où l'on a observé des variations accidentelles de 20 minutes. Dans les régions polaires, l'aiguille oscille quelquefois de plusieurs degrés. L'irrégularité de sa marche pendant toute la journée qui précède l'aurore boréale est un présage du phénomène.

863. **Boussole d'inclinaison.** — L'inclinaison magnétique en un lieu donné se mesure à l'aide de la *boussole d'inclinaison*.

Description. — Cet instrument est entièrement construit en cuivre. Un premier cercle horizontal *m*, gradué et porté par un pied à vis calantes (fig. 831), sert de support à la boussole proprement dite. Celle-ci consiste en un deuxième cercle vertical gradué M, sur lequel se meut une aiguille aimantée. L'axe horizontal de l'aiguille est porté par un châssis *rd*, monté sur un plateau A et mobile autour d'un axe vertical. A l'aide d'un niveau *n* et des trois vis calantes, on peut placer horizontalement le diamètre qui passe par les deux zéros du cercle M.

Mesure de l'inclinaison. — On peut employer deux méthodes, fondées l'une et l'autre sur les équations du § 858.

1° *Méthode directe.* — L'angle I' que fait avec l'horizontale l'aiguille d'inclinaison placée dans un azimut quelconque α, est lié à l'inclinaison absolue I par la relation

$$\text{tang } I' = \text{tang } I \frac{1}{\cos \alpha}.$$

On voit d'après cette équation que tang I' est proportionnelle au facteur $\frac{1}{\cos \alpha}$.

Or celui-ci est maximum pour $\cos \alpha = 0$, c'est-à-dire pour $\alpha = 90^0$: donc tang I', et par suite l'angle I', sera maximum dans un azimut perpendiculaire au méridien magnétique; on aura alors tang $I' = \infty$ et $I' = 90^0$; donc *le méridien magnétique est à 90° de l'azimut dans lequel l'aiguille d'inclinaison est verticale.*

On voit aussi que $\frac{1}{\cos \alpha}$ est minimum pour $\cos \alpha = 1$ et $\alpha = 0^0$; or on a alors tang I' = tang I; donc *l'inclinaison absolue est le plus petit angle que pnisse faire l'aiguille d'inclinaison.*

Opération. — On commence par déterminer le méridien magnétique. Pour cela on tourne le plateau A sur le cercle *m* jusqu'à

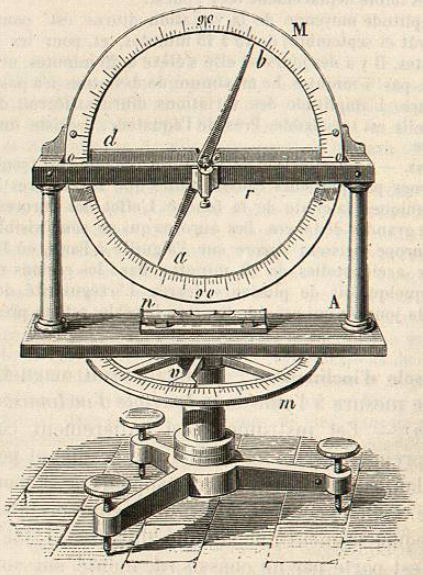

Fig. 831.

ce que l'aiguille devienne verticale : il suffit alors de tourner le plateau A de 90° sur le cercle *m* pour amener le cercle vertical M dans le méridien magnétique. L'angle *dca* que fait alors l'aiguille *ab* avec le diamètre horizontal, est égal à l'inclinaison.

Causes d'erreur et *Corrections.* — Il y a ici deux causes d'erreur dont il importe de tenir compte : 1° L'axe magnétique de l'aiguille peut ne pas coïncider avec son axe de figure; de là une erreur qu'on corrige par la méthode du retournement, comme dans la mesure de la déclinaison (860). 2° Le centre de gravité de l'aiguille peut ne pas coïncider avec l'axe de suspension; alors

l'angle *dca* est trop petit ou trop grand, selon que le centre de gravité est au-dessus ou au-dessous du centre de suspension; car dans le premier cas l'action de la pesanteur est contraire à celle du magnétisme terrestre pour faire incliner l'aiguille, tandis que dans le second elle est de même sens. On corrige cette erreur en renversant les pôles de l'aiguille; ce qui s'obtient en faisant des frictions avec les pôles contraires de deux barreaux, de manière que chaque pôle de l'aiguille soit frotté par un pôle de même nom que lui. La direction de l'aiguille changeant alors de sens, si son centre de gravité était au-dessus du point de suspension, il se met actuellement au-dessous, et l'angle d'inclinaison, qui était trop petit, devient trop grand de la même quantité. On aura donc sa vraie valeur en prenant la moyenne arithmétique des deux mesures.

2° *Méthode des azimuts rectangulaires.* — *Principe.* — Si l'on place l'aiguille d'inclinaison dans un azimut quelconque α, l'angle I' qu'on observe est lié à l'angle I par la relation

$$[1] \qquad \cot I' = \cot I \cos \alpha.$$

Supposons qu'on tourne le limbe de 90°, de manière à le placer dans un azimut α' égal à $90^0 + \alpha$. Comme on a $\cos \alpha' = \cos (90^0 + \alpha) = - \sin a$, la relation entre I et le nouvel angle I'' sera

$$[2] \qquad \cot I'' = - \cot I \sin \alpha.$$

Élevons au carré les deux membres de chaque équation et ajoutons-les, nous aurons

$$[3] \qquad \cot^2 I' + \cot^2 I'' = \cot^2 I (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) = \cot^2 I.$$

Opération. — En faisant deux déterminations dans des azimuts rectangulaires, on obtiendra l'inclinaison au moyen de l'équation [3], sans se préoccuper de déterminer préalablement le méridien magnétique.

864. **Variations de l'inclinaison.** — L'inclinaison, de même que la déclinaison, varie d'un lieu à un autre, mais suivant une loi mieux déterminée. Nous avons vu que dans notre hémisphère c'est le pôle austral de l'aiguille qui plonge au-dessous de l'horizon : on observe vers le pôle Nord des points où l'inclinaison est de 90°; puis, à partir de là, elle décroît avec la latitude jusqu'à l'équateur, où elle est nulle, tantôt sur ce cercle même, tantôt en des points qui en sont peu distants. Dans l'hémisphère austral l'inclinaison reparaît, mais en sens contraire; car c'est le pôle boréal de l'aiguille qui s'abaisse au-dessous de l'horizon.

On nomme *équateur magnétique* la courbe qui passe par tous les points où l'inclinaison est nulle, et *pôles magnétiques* les points où l'inclinaison est de 90°. D'après les observations de Duperrey, l'équateur magnétique coupe l'équateur terrestre en deux points presque diamétralement opposés, l'un dans le Grand Océan, l'autre dans l'océan Atlantique. Ces points paraissent animés d'un mouvement de translation d'orient en occident. Quant aux pôles magnétiques, il en existe deux : l'un dans l'hémisphère boréal, près de l'île Melville; l'autre dans l'hémisphère austral, sur la terre Victoria, à l'ouest du volcan Erebus; mais la position de ces points varie avec celle de l'équateur magnétique.

L'inclinaison varie aussi dans un même lieu d'une époque à une autre. En 1671, elle était à Paris de 75°. Depuis elle a toujours été en décroissant; d'après

les observations faites à l'Observatoire de Montsouris, l'inclinaison était de 65° 34′ 6″ le 30 septembre 1875. Depuis vingt-cinq ans, elle a diminué en moyenne de 3′ 3″ par année.

865. **Mesure de l'intensité du magnétisme terrestre.** — L'action F de la terre sur un pôle d'aimant, en un lieu donné, dépend à la fois de l'intensité du champ magnétique terrestre et de la masse magnétique des pôles de l'aimant.

En appelant H l'intensité du champ magnétique terrestre, en un lieu donné, on a

$$F = H\mu.$$

Le moment de cette action sur une aiguille de longueur $2l$ est, par définition (852),

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

Cette formule suppose, soit que le barreau est libre de se mouvoir dans toutes les directions, soit qu'il peut tourner dans le plan même du méridien magnétique. Mais, s'il s'agissait d'une aiguille assujettie à certaines liaisons, comme une aiguille de déclinaison, on aurait

$$M_1 = 2l\mu H_1,$$

H_1 étant la composante horizontale de la force terrestre. On sait qu'on a $H_1 = H \cos I$, en appelant I l'inclinaison dans le lieu considéré.

La méthode employée pour mesurer l'intensité H du champ en un lieu donné consiste à faire deux expériences successives :

La première a pour objet de fournir $2l\mu H_1$; la deuxième donne $2l\frac{\mu}{H_1}$.

1° *Détermination de* $2l\mu H_1$. — Elle peut se faire soit à l'aide de la balance de Coulomb, soit par la méthode des oscillations. C'est cette dernière qui est la plus précise.

Dans une expérience faite à Göttingue, en 1832, Gauss obtint par cette méthode $2l\mu H_1 = 179\,770\,600$, en prenant pour unités fondamentales la seconde, le millimètre et la masse du milligramme.

2° *Détermination de* $2l\frac{\mu}{H_1}$. — Elle se fait par la méthode de Gauss, qui consiste à faire agir l'aimant qui a déjà servi dans l'expérience précédente, sur une petite aiguille aimantée mobile, dont on observe la déviation.

On place le barreau aimanté AB perpendiculairement au méridien magnétique, et à une certaine distance de l'aiguille. Celle-ci peut être disposée dans deux situations différentes, dites *positions de Gauss.*

Résultats généraux. — Les expériences de Gauss ont donné $\frac{2l\mu}{H_1} = 56\,606\,437$.

Connaissant $2l\mu H_1$ et $\frac{2l\mu}{H_1}$, en divisant membre à membre et extrayant la racine carrée on a $H_1 = 1{,}782088$.

En divisant H_1 par $\cos I$, on aurait H, c'est-à-dire l'intensité du champ magnétique terrestre au lieu de l'expérience.

866. **Moment magnétique des barreaux aimantés.** — Ces méthodes de Gauss conduisent également à la détermination du moment magnétique absolu d'un barreau quelconque. En effet, en soumettant ce barreau aux deux séries de mesures précédentes, on obtiendra par exemple

$$[1] \qquad 2l\mu H_1 = \alpha$$

et

$$[2] \qquad \frac{2l\mu}{H_1} = \beta.$$

En multipliant ces deux équations membre à membre, vient

$$(2l\mu)^2 = \alpha\beta,$$

d'où

$$2l\mu = \sqrt{\alpha\beta}.$$

Pour donner une idée de l'ordre de grandeur de ces moments magnétiques, nous citerons les nombres de Gauss relatifs au barreau qui a servi dans ses expériences. On avait

$$\alpha = 56\,606\,437,$$
$$\beta = 179\,770\,600$$

et

$$2\lambda\mu = 100\,900\,000.$$

867. **Distribution et variations du magnétisme terrestre.** — Un grand nombre de physiciens et de navigateurs ont mesuré l'intensité du champ magnétique terrestre en différents lieux et à différentes époques. On a ainsi trouvé les lois suivantes :

1° L'intensité augmente à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur magnétique, et elle paraît être une fois et demie plus grande aux pôles que sur cette ligne ; la ligne *sans inclinaison* est donc en même temps la ligne de *moindre intensité.*

2° L'intensité décroît à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, d'après une loi qui est probablement celle du rapport inverse du carré des distances.

3° Elle varie avec les heures de la journée, et atteint un *minimum* entre dix et onze heures du matin, et un *maximum* entre quatre et cinq heures de l'après-midi.

4° Enfin, elle présente des variations irrégulières, comme la déclinaison et l'inclinaison. Ainsi elle éprouve des perturbations accidentelles par l'influence des aurores boréales.

5° On nomme *lignes isodynamiques* des lignes qui, sur la surface du globe, présentent en tous leurs points la même intensité magnétique ; *lignes isogones,* celles qui présentent partout la même déclinaison, et *lignes isoclines,* celles d'égale inclinaison. Duperrey a construit neuf courbes isodynamiques au nord et autant au sud de l'équateur magnétique, et il a trouvé que ces lignes, par leur courbure et leur direction, ont une grande analogie avec les *lignes isothermes* (ou d'égale température).

868. **Aiguille et système astatiques.** — On nomme *aiguille astatique* une aiguille aimantée qui est soustraite à l'action magnétique de la terre. Telle serait une aiguille mobile autour d'un axe situé dans le plan du méridien magnétique, parallèlement à l'inclinaison ; car le couple magnétique terrestre, agissant alors suivant l'axe, ne pourrait imprimer à l'aiguille aucun mouvement.

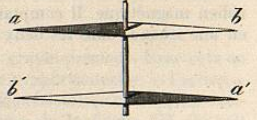

Fig. 832.

On appelle *système astatique* l'ensemble de deux aiguilles aimantées au même degré et réunies parallèlement, les pôles contraires en regard, comme le montre la figure 832. Si les pôles sont rigoureusement de même intensité, les actions contraires du magnétisme terrestre sur les pôles en regard se détruisent deux à deux et le système est astatique. On verra une application importante d'un pareil système dans le *galvanomètre*.

CHAPITRE III

DISTRIBUTION DU MAGNÉTISME DANS LES BARREAUX AIMANTÉS. PROCÉDÉS D'AIMANTATION.

DISTRIBUTION DU MAGNÉTISME.

869. **Expériences de Coulomb.** — Nous avons démontré que l'action tellurique sur un aimant se réduit à un couple dont les forces opposées sont appliquées en deux points distincts appelés *pôles* de l'aimant. Mais un aimant ne possède pas la propriété magnétique en ces deux points seulement : elle existe dans les différentes tranches du barreau, mais à des degrés inégaux.

Pour déterminer la distribution du magnétisme dans un aimant, Coulomb a étudié l'action exercée isolément par les différentes tranches du barreau sur un même pôle d'aimant qu'il plaçait successivement à une même distance de chacune d'elles. Il a employé deux méthodes : la méthode de la *balance* et la méthode des *oscillations*. Nous n'indiquerons que la deuxième.

Méthode des oscillations. — Il prenait une aiguille aimantée *courte* et *fortement trempée*, et il la suspendait à un fil de cocon sans torsion. Il la faisait osciller *horizontalement :* 1° sous l'action de la terre *seule ;* 2° sous la double influence de la terre et du barreau placé devant l'aiguille, dans le plan du méridien magnétique. Il comptait les nombres n et n' des oscillations exécutées en une seconde dans les deux cas. On avait successivement

$$\frac{1}{n} = t = \pi\sqrt{\frac{\Sigma mr^2}{2l\mu H_1}}$$

et

$$\frac{1}{n'} = t' = \pi\sqrt{\frac{\Sigma mr^2}{2l\mu(H_1 + \varphi')}};$$

φ' représente l'action des diverses tranches du barreau sur l'unité du magné-

tisme du pôle de la petite aiguille. Il admettait que *l'action résultante de toutes les tranches qui, dans une position donnée du pôle agissent au-dessus et au-dessous de la tranche étudiée, est proportionnelle à l'action de cette tranche isolée.*

On déduisait des formules précédentes

$$\frac{n'^2}{n^2} = \frac{t^2}{t'^2} = \frac{H_1 + \varphi'}{T}, \qquad \text{d'où} \qquad \frac{\varphi'}{H_1} = \frac{n'^2 - n^2}{n^2}.$$

Pour une autre tranche on avait

$$\frac{\varphi''}{H_1} = \frac{n''^2 - n^2}{n^2}.$$

De là on pouvait déduire le rapport $\frac{\varphi'}{\varphi''}$ des actions de deux tranches différentes du barreau, descendues successivement dans le plan horizontal de la petite aiguille.

870. **Résultats.** — 1° *Courbe du magnétisme.* — Coulomb a étudié des fils cylindriques, de 4 millimètres de diamètre, faits du même acier et fortement trempés. Il les aimantait tous *à saturation.* Ayant déterminé les actions φ', φ'',...

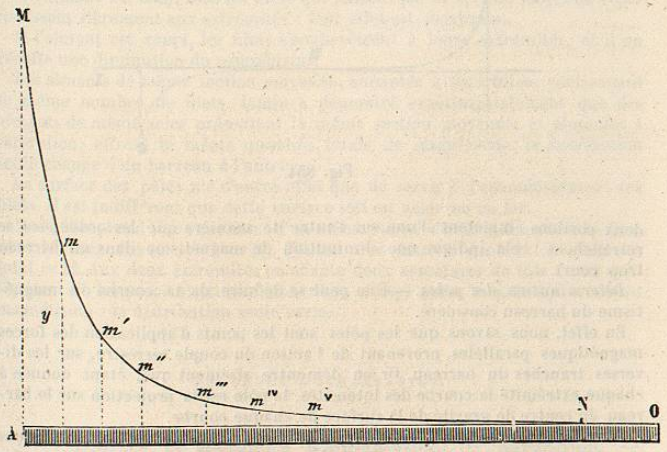

Fig. 833.

des diverses tranches m, m', il les représentait graphiquement. Pour cela on élève en chaque point du barreau une ordonnée proportionnelle à l'action φ correspondante, et par suite à la *quantité de magnétisme* qu'on suppose concentrée dans cette tranche. On a ainsi la courbe de la figure 833. On voit que l'ordonnée, et par suite la quantité de magnétisme, va en croissant depuis un point N, voisin du milieu, où elle est nulle, jusqu'à l'extrémité A du barreau, où elle est maximum. A l'autre moitié du barreau correspond une autre courbe, identique à celle-ci, figurative du magnétisme boréal. On la distingue de la précédente en élevant des ordonnées *négatives*. La courbe complète du