

tous les observatoires; c'est seulement au moyen de ces instruments qui permettent de donner aux observations magnétiques l'exactitude astronomique, qu'on a pu acquérir des notions vraiment importantes sur les variations des éléments du magnétisme terrestre. Leur sensibilité tient soit à la grandeur des aimants qu'on emploie, soit au mode de suspension; leur exactitude est due à l'appareil particulier au moyen duquel on observe.

Le premier de ces appareils est le *magnétomètre unifilaire* ou de *déclinaison*, dont voici la description. Dans une salle convenablement disposée, et pour la construction de laquelle on doit avoir évité tout emploi du fer, on trace (fig. 359) une ligne suivant la direction du méridien magnétique; c'est en deux points

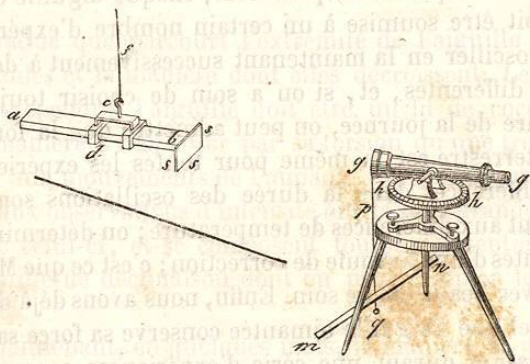


Fig. 359.

de cette ligne que sont placés, d'une part, le barreau aimanté *ab* suspendu à l'extrémité d'un fil *cf* qui va s'enrouler autour d'un petit treuil fixé au plafond, et de l'autre, à une distance d'environ 5 mètres, un théodolite *pn* avec sa lunette *gg* dont l'axe optique est dans le méridien magnétique. Le barreau aimanté, long environ de 600 millimètres, porte à celle de ses extrémités qui regarde le théodolite, un miroir plan *ss* vertical perpendiculaire à son axe magnétique; enfin au-dessous du théodolite on dispose horizontalement une règle divisée *mn*, faisant face au miroir et dont le zéro soit sur la verticale *pg* passant par l'objectif de la lunette; ce sont les divisions de cette règle dont on

regarde l'image dans le miroir du barreau; si son axe magnétique est parallèle à la ligne qui a été tracée, le miroir lui est normal, par conséquent parallèle à la règle divisée, et c'est l'image du zéro, qui vient coïncider avec le point de croisement des fils de la lunette; mais lorsque le barreau est dévié, c'est l'image d'un autre point de l'échelle qui se trouve sur l'axe optique, et il est facile de déduire de la longueur comprise entre le zéro et la division que l'on voit, en même temps que de la distance de la règle au miroir, l'angle dont on a tourné le barreau. Il faut remarquer que ce mode d'observation présente l'avantage que, parmi tous les mouvements dont est nécessairement susceptible le barreau et par conséquent aussi le miroir, le mouvement angulaire, dans un plan horizontal, est le seul qui influe sur la lecture de l'échelle. Sans vouloir entrer dans tous les détails que comporterait la description complète de cet appareil, nous ajouterons quelques mots sur les principales parties qui le composent, et dont les figures 360 et 361 donnent la projection verticale et la projection horizontale. Le fil est

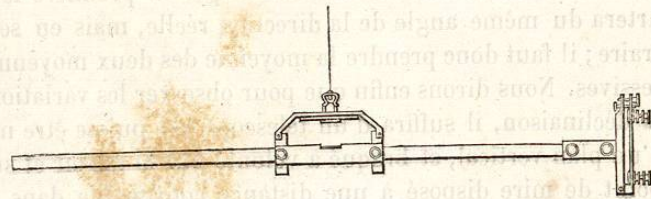


Fig. 360.

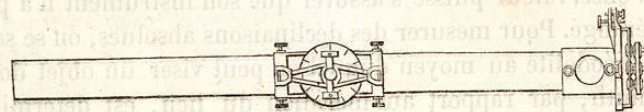


Fig. 361.

formé de fils de cocon en nombre suffisant pour pouvoir supporter avec le barreau un poids de 1 kilogramme qu'on ajoute dans la recherche du moment d'inertie. Le fil n'est pas fixé directement à l'étrier qui supporte le barreau, mais à un cercle horizontal appelé cercle de torsion, et sur lequel repose l'étrier,

de telle manière qu'en tournant ce cercle on peut amener le fil à être sans torsion, tout en laissant au barreau la direction que l'on veut. Tout l'appareil est renfermé dans une boîte cylindrique dont le couvercle laisse passer le fil de suspension, et qui présente une ouverture latérale vis-à-vis du miroir.

De la grande sensibilité du magnétomètre, il résulte que le barreau est toujours en mouvement, que par conséquent il faut remplacer les observations immédiates par des observations indirectes qui n'exigent pas un repos complet, et déduire des oscillations de l'aimant la position qu'il occuperait si, à cet instant, il était en équilibre. Le procédé le plus simple serait de prendre le bissectrice de l'angle des deux positions successives et extrêmes du barreau, mais il est loin d'être exact dès que l'oscillation a une certaine amplitude, car dans ce cas l'amplitude diminue pendant la durée même de l'oscillation, et la direction d'équilibre est moins rapprochée de la première position extrême que de la dernière; si celle-ci est prise pour point de départ d'une seconde oscillation, la direction d'équilibre, déterminée de la même manière que la première fois, s'écartera du même angle de la direction réelle, mais en sens contraire; il faut donc prendre la moyenne des deux moyennes successives. Nous dirons enfin que pour observer les variations de la déclinaison, il suffira d'un télescope qui puisse être mu dans un plan vertical, et braqué à volonté sur le miroir et sur un point de mire disposé à une distance convenable dans le plan vertical passant par la ligne tracée primitivement, afin que l'observateur puisse s'assurer que son instrument n'a pas été dérangé. Pour mesurer des déclinaisons absolues, on se sert d'un théodolite au moyen duquel on peut viser un objet dont l'azimuth, par rapport au méridien du lieu, est déterminé d'avance.

Le second des appareils imaginés par Gauss est le *magnétomètre bifilaire*. Il était naturel de supposer que l'intensité de la force magnétique était, tout autant que sa direction, soumise à des variations continues; or les observations d'intensité dont nous avons parlé ne peuvent servir qu'à déterminer sa valeur moyenne pendant le temps que dure l'expérience, et il est im-

possible de trop raccourcir ce temps sans courir le risque de commettre une erreur sensible sur la durée de l'oscillation; il était donc indispensable, pour étudier les variations de l'intensité magnétique, de recourir à un nouveau moyen; c'est ce qu'a fait Gauss en inventant le magnétomètre bifilaire. Lorsqu'un corps, suspendu par deux fils, est soumis uniquement à l'action de la pesanteur, il se met en équilibre dans une position déterminée par les conditions particulières auxquelles satisfont les points d'attache des fils et le centre de gravité du corps lui-même. Si on le dérange de sa position d'équilibre, il tend à y revenir en vertu de la pesanteur qui se transforme ici en une force directrice. Supposons maintenant que ce corps soit une aiguille aimantée; elle prendra une position d'équilibre intermédiaire entre celle qui dépendrait uniquement du mode de suspension, et la direction du méridien magnétique; et, dans cette position, on saura que le moment magnétique est précisément égal et contraire à celui de la pesanteur, que l'on peut calculer¹, et d'où l'on déduit, par conséquent, la force directrice qui agit sur l'aiguille. Si son intensité vient à changer, la position d'équilibre changera aussi, et ses variations se traduiront ainsi en variations angulaires. On dispose l'instrument de manière que, pour une valeur moyenne de l'intensité, le barreau, dans sa position d'équilibre, soit perpendiculaire au méridien magnétique; il en résulte que les petits changements de déclinaison n'ont sur cette position aucune influence, tandis que les moindres variations dans l'intensité l'affectent immédiatement. Le mode d'ob-

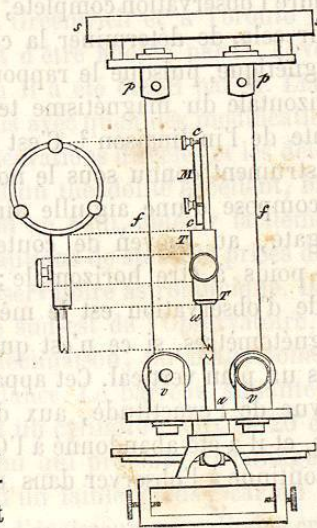


Fig. 362.

¹ Voyez note finale B.

servation est le même que pour le magnétomètre de déclinaison, c'est-à-dire que l'on vise dans un miroir, fixé au barreau, l'image d'une règle divisée; les fils sont en acier, et viennent s'attacher en deux points du diamètre d'un cercle divisé, sur lequel (fig. 362) peuvent tourner deux alidades munies de vernier, dont l'une porte un miroir vertical mobile autour d'un axe vertical, et l'autre l'étrier dans lequel se place le barreau¹; les diverses parties de l'instrument doivent être considérées comme liées invariablement les unes aux autres, lorsqu'on observe les variations de l'intensité; et ce n'est que pour la détermination de l'intensité elle-même, qu'on se sert des mouvements de rotation dont elles sont susceptibles. Nous verrons, quand nous nous occuperons du procédé photographique pour l'enregistrement des observations, comment on peut se mettre à l'abri de l'influence de la température, qui risquerait d'altérer les résultats.

La déclinaison et l'intensité horizontale, une fois déterminées au moyen des deux magnétomètres, il faudrait, pour rendre l'observation complète, connaître l'inclinaison; il suffit, pour cela, de déterminer la composante verticale de la force magnétique, puisque le rapport de la force verticale à la force horizontale du magnétisme terrestre n'est autre que la tangente de l'inclinaison². C'est dans ce but qu'a été construit l'instrument connu sous le nom de magnétomètre-balance. Il se compose d'une aiguille aimantée, reposant sur des plans d'agate, au moyen de couteaux, et amenée par un contre-poids à être horizontale; un miroir lui est fixé, et le mode d'observation est le même que dans les deux autres magnétomètres, si ce n'est que la déviation observée a lieu dans un plan vertical. Cet appareil est très-inférieur, au point de vue de l'exactitude, aux deux autres précédemment décrits, et il a été abandonné à l'Observatoire de Bruxelles; mais on continue à l'observer dans ceux de Greenwich et de Paris.

¹ Voyez tome I, page 590.

² Dans la fig. 362 le miroir est représenté dans deux plans différents perpendiculaires l'un à l'autre et tous deux verticaux.

Quand on eut établi dans un grand nombre d'observatoires magnétiques des instruments assez sensibles pour accuser les moindres variations des éléments du magnétisme terrestre, on comprit bien vite la nécessité d'observer les phénomènes à des intervalles beaucoup plus rapprochés qu'on ne l'avait fait jusqu'alors, et on fut conduit ainsi à inventer des appareils dans lesquels les observations pussent s'enregistrer d'elles-mêmes. Il existe maintenant deux systèmes principaux d'instruments enregistreurs, ceux dans lesquels les indications sont obtenues par des appareils mécaniques, et ceux dans lesquels l'inscription se fait par le moyen de la photographie. Le premier système a été employé longtemps dans plusieurs observatoires, et notamment à celui de Bruxelles où il a donné d'excellents résultats; il varie beaucoup dans ses détails, mais quelque perfection qu'on apporte dans la construction des appareils, il est impossible d'éviter que la sensibilité des instruments ne soit plus ou moins altérée par l'intervention et l'inertie des pièces indicatrices.

Le système photographique ne présente pas cet inconvénient. Aussi, après avoir été installé à Greenwich et à Toronto par M. Brooke son inventeur, il vient d'être adopté par M. Leverrier à l'Observatoire de Paris où il a été établi par M. Liais, d'après le plan de M. Brooke, mais avec quelques modifications heureuses pour permettre les observations directes et les déterminations absolues. Au moyen d'un théodolite excellent, bien exécuté, on peut toujours, quand on veut, obtenir facilement la déclinaison absolue; les précautions de stabilité prises dans ce but sont toutes celles d'un observatoire astronomique. Dans un pavillon isolé, situé à l'angle sud-est de l'Observatoire, on a placé un magnétomètre de déclinaison, un magnétomètre bifilaire et un magnétomètre-balance. Le barreau aimanté du magnétomètre de déclinaison est un cylindre creux de 20 centimètres de longueur; disposition qui présente l'avantage de fournir des aimants puissants d'un faible poids; car on sait qu'à partir d'une certaine limite d'épaisseur, un cylindre creux s'aimante à peu près au même degré qu'un cylindre plein. Le barreau étant creux, on en fait une lunette-collimateur; il

porte, à l'une de ses extrémités, au sud, une lentille; à l'autre, au nord, une échelle horizontale divisée, qui est au foyer principal de la lentille; les rayons qui en émanent sortent parallèles, de sorte que l'échelle est visible avec le théodolite.

Voici maintenant comment s'opère le tracé photographique. Le barreau supporte un miroir concave en métal qui se meut avec lui. A soixante-cinq centimètres de ce miroir se trouve un bec de gaz dont la cheminée présente une fente verticale du côté du miroir. Les rayons émanés de cette fente et réfléchis par le miroir forment à trois mètres du miroir, au foyer conjugué, une image de la fente verticale. La fente n'est pas sur l'axe même du miroir, afin d'éviter que les rayons réfléchis ne soient interceptés par la cheminée; mais elle est légèrement déviée. Par cette disposition, on voit que l'image de la fente se meut horizontalement, par rapport au centre de la boussole, d'un angle double de celui du barreau. Un système de deux lentilles cylindriques de trente centimètres de longueur, et à court foyer, est disposé horizontalement, de manière à concentrer en un point lumineux l'image de la fente, sans cependant réagir sur la direction de ce point. Ces lentilles auraient été inutiles si la source de lumière avait été un point au lieu d'une fente, mais alors on n'aurait pas eu assez de lumière pour obtenir un tracé photographique.

Derrière les lentilles cylindriques se trouve un cylindre de vingt centimètres de diamètre, recouvert de papier photographique, et auquel un chronomètre imprime une rotation d'un tour en vingt-quatre heures. Ce cylindre reçoit le point lumineux dont les déplacements ont lieu parallèlement à son axe. Le cylindre étant animé d'un mouvement de rotation, le point lumineux décrit à sa surface une courbe qui impressionne le papier sensible.

Sur la monture du cylindre se trouve une lentille munie d'un prisme, au moyen de laquelle un second bec de gaz, fixé sur le même pilier que ce cylindre, trace photographiquement une ligne de repère. C'est la variation de la distance entre cette ligne de repère et la courbe, distance indépendante de la position donnée au papier sur le cylindre, qui fait connaître les

changements de la déclinaison. Un obturateur permet de faire sur la courbe de petites interruptions qui servent à fournir des repères pour régler l'échelle des heures.

Sur le même cylindre enregistreur se trouve, du côté opposé au point lumineux fourni par la boussole de déclinaison, un troisième point lumineux qui trace la courbe des variations de la force horizontale. Ce troisième point est fourni par le magnétomètre bifilaire, placé sur un pilier à l'angle sud-ouest du pavillon.

Un barreau semblable à celui de la boussole de déclinaison est maintenu par une suspension à deux fils, dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique. Son pôle nord, celui qui porte l'échelle divisée, est à l'ouest. Ce barreau est observable avec le même théodolite que la boussole de déclinaison. Cette disposition permet de déterminer rapidement, en un instant quelconque, la situation exacte de l'axe magnétique de ce barreau par rapport au méridien astronomique. En faisant cette détermination pour diverses lectures du cercle de torsion, on en peut déduire l'angle de torsion nécessaire pour amener l'axe magnétique dans le plan perpendiculaire au méridien magnétique. Connaissant alors le poids de l'appareil, l'écartement des crochets de suspension et la longueur du faisceau, on a, en fonction de la pesanteur, la valeur du couple de torsion qui fait équilibre au couple magnétique; ce dernier couple a pour mesure le produit du moment magnétique du barreau par la force horizontale du globe. Si alors on dévie, suivant la méthode de Gauss, la boussole de déclinaison avec le barreau bifilaire, pour en déduire le rapport du moment magnétique de ce barreau à la force du globe, on a les éléments nécessaires pour obtenir la mesure de la force horizontale du globe.

Les faisceaux de suspension du magnétomètre bifilaire sont renfermés dans un tube de verre; ils ont un mètre de longueur. Le barreau est renfermé dans une boîte octogone en glace, semblable à celle de la boussole de déclinaison. Le barreau est également placé entre deux planches de cuivre et porte, pour l'enregistrement photographique, un miroir concave en tout semblable à celui de la boussole de déclinaison.

Le moment magnétique d'un barreau aimanté changeant avec la température, et la situation du barreau dépendant du produit de ce moment magnétique par la force du globe, il en résulterait la nécessité de corriger les courbes des influences de la température, point par point, si l'on n'avait compensé l'instrument contre les effets de la chaleur. M. Brooke a obtenu cette compensation en faisant varier le couple de torsion, sous l'influence de la température dans le même rapport que le magnétisme du barreau dont les variations ont été préalablement déterminées par expérience. Il a suffi pour cela de faire en sorte que les deux crochets de suspension se rapprochent quand la température s'élève, effet que l'on a obtenu par l'inégalité de dilatation du verre et du zinc. L'instrument peut à volonté fonctionner avec ou sans compensation.

Le magnétomètre de force verticale est placé à l'est du pavillon. Il consiste en un barreau collimateur semblable à ceux des deux autres instruments, et supporté sur un plan d'agate par une suspension de balance à couteaux d'acier. Ces couteaux sont dans le méridien magnétique, de sorte que le barreau se meut dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique. Son magnétisme tendrait alors à le rendre vertical, mais un contre-poids le maintient horizontal. Les variations de la force verticale du magnétisme font incliner cet instrument comme une balance; sa sensibilité dépend de l'abaissement du centre de gravité et se règle à volonté. Comme pour le magnétomètre bifilaire il faut une compensation contre les effets de la température; cette compensation est obtenue par un thermomètre porté par le barreau, et dont les dimensions ont été déterminées par M. Brooke, d'après l'étude des variations du magnétisme du barreau. Quand la température s'élève, l'élévation du thermomètre augmente le poids du côté du pôle nord du barreau. Ce thermomètre peut être enlevé à volonté. La situation de l'axe magnétique par rapport à l'horizon et au méridien magnétique peut être sans cesse déterminée par le théodolite.

L'enregistrement photographique se fait comme pour les deux autres instruments, sauf que le mouvement du point

lumineux, au lieu d'avoir lieu dans un plan horizontal, a lieu dans un plan vertical. Cette condition a forcé à employer un cylindre différent de celui qui sert aux deux autres instruments.

La préparation des papiers photographiques n'est pas un obstacle à l'emploi des instruments à indications continues. A l'Observatoire de Paris, on a abandonné les procédés humides qui obligeaient à préparer le papier chaque jour et à faire paraître immédiatement les épreuves; on a également abandonné les papiers cirés, qui sont dispendieux et longs à préparer à cause du séjour prolongé qu'il faut leur faire subir sur un bain. On a tenu à obtenir des épreuves sur papier ordinaire et sec. En quelques heures on peut préparer du papier pour quinze jours, et se contenter de faire paraître les épreuves à l'acide gallique à la fin de chaque semaine.

Le papier est sensibilisé avec l'iodure et le bromure d'ammonium, le nitrate d'argent et l'acide acétique. Après avoir été séché, il est conservé à l'abri de la lumière, et est en état d'être employé. Les feuilles retirées des cylindres sont conservées. On fait paraître les images avec l'acide gallique dilué, et on les fixe à l'hyposulfite de soude.

§ 2. Résultats des observations relatives à la détermination des éléments du magnétisme terrestre et de leurs variations.

Après avoir décrit les principaux instruments destinés aux observations de magnétisme terrestre, nous allons passer à l'exposition des résultats déjà nombreux que ces observations ont fournis.

Halley est le premier physicien qui paraisse s'être fait une idée juste de ce que c'est que le magnétisme terrestre; il publia une carte des lignes de déclinaison de l'aiguille aimantée en 1701, à son retour d'un voyage maritime entrepris dans le but spécial de faire des observations magnétiques, dans lequel il visita les côtes *est* et *ouest* de l'océan Atlantique et plusieurs îles de l'un et l'autre hémisphère, aussi loin que les glaces lui permirent d'avancer. Indépendamment de ses propres observations, Halley recueillait avec soin toutes les observations dignes