3° *Elle est proportionnelle à la racine carrée du diamètre du barreau.*

L'influence des deux premières causes a une limite; car le barreau, en s'aimantant davantage, approche de plus en plus d'un état de saturation au delà duquel sa force magnétique reste constante, malgré l'accroissement d'intensité du courant et la multiplication des tours de l'hélice. En outre, les spires de l'hélice, en s'enroulant les unes sur les autres, s'écartent progressivement du fer et par suite leur action magnétisante décroît aussi progressivement.

Quant à la troisième loi, on peut démontrer, par le calcul, qu'elle n'est plus applicable quand le courant est très intense, parce qu'alors la puissance de l'électro-aimant croît beaucoup plus vite que la racine carrée du diamètre du fer.

On a aussi cherché l'influence de la longueur du barreau, mais les expériences ont été peu concordantes. Cependant on peut dire que la longueur est sans influence dans les électro-aimants en fer à cheval, mais que dans les électro-aimants droits la puissance augmente, jusqu'à une certaine limite, avec la longueur.

Enfin, le calcul et l'expérience montrent que, *pour obtenir le maximum d'effet d'un électro-aimant, la résistance de la bobine doit égaler la somme totale des résistances extérieures.* Il importe donc de combiner la longueur et et le diamètre du fil de façon que cette condition soit satisfaite. Si le circuit extérieur présente une grande résistance, comme dans les lignes télégraphiques, on fera usage d'un fil fin très long; ce sera l'inverse si la résistance extérieure est faible.

1076. **Substances diamagnétiques et substances paramagnétiques.** — Nous avons dit précédemment qu'en réalité les aimants agissent sur toutes les substances, par attraction sur les unes, et par répulsion sur les autres. Ces effets, qui furent d'abord attribués à la présence de quantités infiniment petites de fer dans les substances sur lesquelles on expérimentait, ne furent nettement établis que par Faraday, en 1847, à l'aide de ses puissants électro-aimants.

Ce savant a appelé *diamagnétiques* les corps repoussés, et *paramagnétiques*, ou simplement *magnétiques*, ceux qui sont attirés; et comme il expérimentait avec des électro-aimants, il a donné le nom de *direction axiale* à celle qui coïncide avec la droite qui joint les deux pôles de l'électro-aimant, et celui de *direction équatoriale* à celle qui est perpendiculaire à la même ligne. Il a reconnu que le nombre des substances diamagnétiques est beaucoup plus grand que celui des substances magnétiques.

Les substances diamagnétiques sont le bismuth, le plomb, l'antimoine, le zinc, le cuivre, le cristal de roche, le verre, le sel marin, le plâtre, le charbon, le soufre, et en général les substances organiques, comme les résines, le sucre, le bois, la chair des animaux. Les substances magnétiques sont le fer, le nickel, le cobalt, le chrome et la plupart des métaux. On peut admettre aujourd'hui qu'il n'est pas une seule substance sur laquelle n'agissent, dans un sens ou dans l'autre, les aimants puissants.

CHAPITRE VIII

MESURE DE L'INTENSITÉ DES COURANTS. GALVANOMÈTRES ET BOUSSOLES.

1077. **Méthodes et instruments de mesure.** — Pour comparer les courants au point de vue de l'intensité et pour étudier les variations que subit l'intensité d'un courant dans des circonstances particulières, il faut savoir mesurer avec précision l'intensité du courant à un instant quelconque.

1° *Méthode électrochimique.* — Nous avons indiqué une première méthode de mesure, due à Davy. Elle est fondée sur la comparaison des effets chimiques des courants. Lorsqu'un courant électrique traverse un composé binaire ou ternaire, on sait qu'il le décompose en ses éléments : les éléments électronégatifs se déposent à l'électrode *positive*, tandis que l'élément électropositif se dépose à l'électrode *négative*. Si le composé électrolysé est de l'eau (acidulée pour qu'elle soit conductrice), elle est décomposée en hydrogène qui se dégage à l'électrode négative, et en oxygène qui se dégage à l'électrode positive. Si c'est un sel métallique, par exemple du sulfate de protoxyde de cuivre, l'acide et l'oxygène se dégagent à l'électrode positive, tandis que le métal se dépose sur l'électrode négative. Dans l'un et l'autre cas, la quantité de l'électrolyte décomposée par un même courant, ou, si l'on veut, la quantité de l'un ou de l'autre des éléments qui se déposent sur les électrodes, est proportionnelle à la durée de l'expérience pour un même électrolyte, et à l'équivalent chimique de l'électrolyte pour un même intervalle de temps, et, toutes choses égales d'ailleurs, elle est *proportionnelle à la quantité d'électricité* qui traverse l'électrolyte.

Or l'intensité d'un courant doit être considérée, à priori, comme proportionnelle à la quantité d'électricité qui passe, dans l'unité de temps, par une section quelconque du circuit. L'expérience ayant démontré que le poids d'hydrogène dégagé est proportionnel à cette quantité d'électricité, on doit en conclure que *l'intensité d'un courant est proportionnelle au poids* d'hydrogène qu'il dégage ou *au poids* de tout autre électrolyte qu'il précipite *en une seconde dans l'unité de temps*. L'intensité, mesurée par cette méthode, est ce que nous avons appelé l'*intensité électrochimique*.

Application de la méthode électrochimique. — Supposons qu'on ait déterminé par une méthode quelconque le nombre de coulombs qui correspondent à la décomposition *d'un équivalent d'eau*, et, par suite, au dégagement de 1 gramme d'hydrogène. On a fait cette détermination, et on en a déduit que

$$1 \text{ coulomb dégage } 0^{mmg},0105 \text{ d'hydrogène.}$$

Si donc on appelle e l'équivalent chimique d'un corps, on saura, d'après la loi de Faraday, que

$$1 \text{ coulomb dégage } 0,0105 \times e = e_1 \text{ de ce corps.}$$

Ce poids, ainsi déterminé, s'appelle l'*équivalent électrochimique* du corps. C'est un coefficient constant pour chaque substance, comme son équivalent chimique.

Cela posé, supposons qu'on fasse passer le courant inconnu, pendant t secondes, dans un électrolyte dont on connaît l'équivalent électrochimique e_1. Soit p le poids déposé.

Le nombre de coulombs Q qui correspondent au poids p est donné par la formule

$$Q = \frac{p}{e_1} = \frac{p}{0,0105 \times e}.$$

On a d'ailleurs entre l'intensité i cherchée et la quantité Q la relation de définition

$$Q = it, \quad \text{d'où} \quad i = \frac{p}{0,0105 \times e \times t}.$$

Remarque. — On pourrait employer le voltamètre pour faire ces mesures; mais comme les corps qui résultent de l'électrolyse de l'eau sont gazeux et difficiles à recueillir, il est préférable de prendre comme électrolyte la dissolution d'un sel métallique, comme le sulfate de cuivre : le métal déposé pendant un certain temps est alors facile à peser [1].

2° *Méthode électromagnétique.* — Il existe une deuxième méthode de mesure, à la fois plus précise et plus commode que la précédente. Elle est fondée sur la comparaison des effets électromagnétiques des courants. On l'applique à l'aide d'instruments spéciaux appelés *galvanomètres* et *boussoles*, qui sont des applications de l'expérience d'Œrsted. Le courant électrique passe dans l'instrument, et agit sur une aiguille aimantée qui est déviée plus ou moins. Le sens de la déviation dépend du sens du courant, et la grandeur de la déviation est une fonction de l'intensité.

Pour les boussoles, cette fonction peut se calculer rigoureusement à l'aide des formules d'Ampère. Ainsi, pour la *boussole des tangentes* la fonction peut se réduire à $I = K \tang \alpha$, K étant une constante caractéristique de l'instrument. Pour la *boussole des sinus*, on a $I = K' \sin \alpha$, K' étant une autre constante également caractéristique de l'instrument. Pour les galvanomètres cette fonction est très compliquée : on est obligé de la déterminer empiriquement. C'est au moyen d'une *formule empirique*, ou, ce qui est la même chose, d'une table de graduation, qu'on déduit l'intensité I de la déviation observée α.

1. Colson, *Traité élémentaire d'électricité.*

1078. **Galvanomètre ordinaire.** — 1° *Définition.* — Le *galvanomètre*, connu aussi sous les noms de *multiplicateur* et de *rhéomètre*, fut construit par Schweigger, peu après la découverte d'Œrsted. Cet instrument est une application directe de l'action des courants sur les aimants : par la déviation qu'il imprime à l'aiguille il décèle la présence des courants, par le sens de la déviation il en fait connaître la direction, et par l'angle d'écart il sert à en mesurer l'intensité.

2° *Construction.* — L'action directrice de la terre, qui tend à maintenir l'aiguille aimantée dans le méridien magnétique, est une force antagoniste qui diminue la déviation de l'aiguille par le courant et qui peut l'annuler si le courant n'est pas assez intense. Il importe donc à la fois de multiplier l'action des courants et de diminuer celle de la terre. Ce double résultat a été obtenu par les procédés suivants.

Multiplicateur de Schweigger. — Schweigger eut l'idée de replier plusieurs fois le fil conducteur du courant de manière à former un circuit multiple rectangulaire vertical au centre duquel l'aiguille est suspendue par un fil de cocon (fig. 999). Si l'on appli-

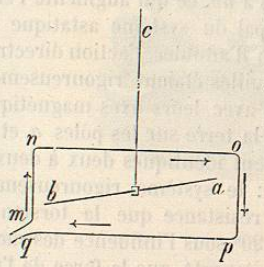

Fig. 999.

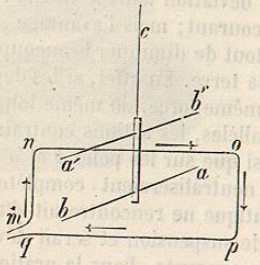

Fig. 1000.

que dans ce cas la règle d'Ampère, on reconnaît facilement que, lorsqu'un courant parcourt le circuit *mnopq*, les quatre parties *mn*, *no*, *op* et *pq* agissent dans le même sens pour faire dévier le pôle *a* en arrière du plan *mnop*, et le pôle *b* en avant. En enroulant le fil dans le plan vertical de l'aiguille, on a donc *multiplié* l'action du courant : de là le nom de *cadre multiplicateur* ou de

multiplicateur donné à cet appareil. Cette multiplication augmente en même temps que le nombre des circuits, du moins *jusqu'à une certaine limite;* car on sait que l'intensité d'un courant s'affaiblit lorsqu'on augmente la longueur et, par suite, la résistance du circuit qu'il parcourt.

Remarque. — Le fil de cuivre ainsi enroulé doit être recouvert de soie avec soin; sinon, l'électricité passerait d'une spire à la suivante et l'ensemble des spires se comporterait comme un circuit unique d'un diamètre égal à la somme des diamètres des fils juxtaposés. (Tyndall a observé que la soie blanche est préférable à la soie verte qu'on emploie ordinairement, la matière colorante de celle-ci contenant souvent du fer en quantité suffisante pour imprimer à l'aiguille une déviation de plusieurs degrés.)

Aiguille astatique de Nobili. — Nobili fit agir le circuit, non sur une seule aiguille, mais sur un système astatique (868) de deux aiguilles (fig. 1000), l'une intérieure et l'autre extérieure au fil, et liées ensemble de manière à ne pouvoir tourner l'une sans l'autre. L'aiguille intérieure *ab* est alors influencée comme ci-dessus par le circuit *mnopq*; mais les différentes parties de celui-ci n'agissent pas également sur l'aiguille *a'b'*. En effet, d'après la règle d'Ampère, la partie *no* tend à ramener le pôle *a'* en avant, tandis que les trois portions *mn*, *op* et *pq* tendent à le pousser en arrière. C'est l'action *no* qui prédomine, à cause de la moindre distance, et par suite l'action résultante du circuit complet imprime à *a'b'* une déviation dans le même sens qu'à *ab*, ce qui augmente l'effet du courant; mais l'avantage principal du système astatique est surtout de diminuer beaucoup, sinon d'annuler, l'action directrice de la terre. En effet, si les deux aiguilles étaient rigoureusement de même force, de même longueur, avec leurs axes magnétiques parallèles, les actions contraires de la terre sur les pôles *a* et *b'*, ainsi que sur les pôles *b* et *a'*, seraient identiques deux à deux et se neutraliseraient complètement : le système rigoureusement astatique ne rencontrerait d'autre résistance que la torsion du fil de suspension et serait dévié de 90° sous l'influence des moindres courants. Dans la pratique, il importe que la force de l'une des aiguilles l'emporte toujours sur celle de l'autre, de manière que la terre les dirige faiblement. Cette action antagoniste, qui augmente avec la déviation, finit par annuler l'action du courant et à produire l'équilibre de l'aiguille dans un azimut α différent de 90°. D'ailleurs cette différence des aiguilles pouvant être rendue aussi petite qu'on le veut, ne nuit pas à la sensibilité de l'instrument et l'on peut arriver à une déviation appréciable même pour des courants extrêmement faibles.

3° *Description détaillée du galvanomètre ordinaire.* — La figure 1001 représente un galvanomètre ordinaire *à deux aiguilles*, construit par Ruhmkorff. Il est enfermé dans une cage en verre, qui le soustrait aux agitations de l'air ambiant, ainsi qu'à l'oxydation.

Le pied de l'instrument est un disque épais D, de laiton, porté par trois vis calantes; au-dessus est un plateau tournant P, de

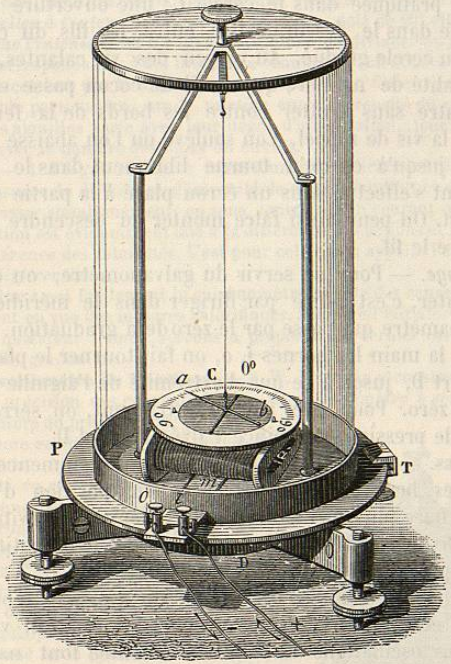

Fig. 1001.

même métal, sur lequel est fixé un cadre de cuivre rouge, d'une largeur presque égale à la longueur des aiguilles. Sur ce cadre s'enroule un grand nombre de fois un fil de cuivre rouge *m*, recouvert de soie. Ses deux bouts arrivent à des bornes *i* et *o*, destinées à recevoir les rhéophores du courant qu'on veut étudier. Au-dessus du cadre est un cercle gradué C, également en cuivre rouge, qui est fendu suivant un diamètre parallèle à la direction du fil enroulé en dessous. Le zéro de la

graduation correspond à la fente pratiquée dans le cercle, et elle va des deux côtés depuis 0° jusqu'à 90°. Enfin, sur les côtés du cadre s'élèvent deux colonnes qui portent une vis de rappel à laquelle est suspendu par un fil de cocon un système astatique de deux aiguilles *ab* et *a'b'*. L'aiguille *ab* qui est au-dessus du cercle sert à marquer les déviations; l'aiguille *a'b'* est dans l'intérieur du circuit. C'est pour introduire cette aiguille qu'une fente est pratiquée dans le cercle C; une ouverture semblable, non visible dans le dessin, existe entre les fils du circuit, au-dessous du cercle gradué. Au moyen des vis calantes, on établit l'horizontalité de manière que le fil de cocon passe exactement par le centre sans frotter contre les bords de la fente; et, à l'aide de la vis de rappel, l'on soulève ou l'on abaisse le système astatique jusqu'à ce qu'il tourne librement dans le circuit. Ce mouvement s'effectue dans un écrou placé à la partie supérieure du support. On peut ainsi faire monter ou descendre le système sans tordre le fil.

4° *Réglage.* — Pour se servir du galvanomètre, on commence par l'orienter, c'est-à-dire par diriger dans le méridien magnétique le diamètre qui passe par le zéro de la graduation. Pour cela, prenant à la main les bornes *i*, *o*, on fait tourner le plateau P sur son support D, jusqu'à ce que l'extrémité de l'aiguille *ab* corresponde au zéro. Pour fixer alors l'instrument, on serre, à l'aide d'une vis de pression, une pince T fixée au pied D.

Remarques. — 1° A l'instant où le courant commence à passer, les aiguilles, brusquement écartées de leur position d'équilibre, tendent à faire plusieurs tours sur elles-mêmes. On évite cette rotation en fixant, en regard des divisions 90, deux petites bornes contre lesquelles bute l'aiguille supérieure.

2° C'est pour amortir les oscillations du système qu'on emploie un cadran et un cadre de cuivre rouge. En effet, on verra plus tard que les oscillations de l'aiguille aimantée font naître dans ce métal des courants dits *d'induction* qui, réagissant sur elle, l'arrêtent très rapidement.

1079. **Graduation du galvanomètre. — Galvanomètre différentiel.** — Cet instrument, extrêmement commode pour constater la présence des courants, n'en mesure pas directement l'intensité. Nous avons vu qu'il faut construire des tables de graduation, qui donnent l'intensité relative du courant correspondante à chaque déviation de l'aiguille.

La méthode la plus simple pour former ces tables est celle du *multiplicateur à deux fils*, due à Becquerel. On enroule simultanément, sur le cadre de l'appareil, deux fils de cuivre recouverts de soie, identiques en longueur et en diamètre, et choisissant une source d'électricité dynamique constante, mais très faible, on fait passer le courant dans un des fils, ce qui donne une certaine déviation, soit 5°.

On choisit ensuite une seconde source électrique de même intensité que la première et l'on s'en assure en faisant passer les deux courants, simultanément et en sens inverse, dans les deux fils : l'aiguille doit rester au zéro. Si ensuite on les fait passer simultanément et dans le même sens, on soumet évidemment l'aiguille à l'action d'un courant d'intensité double du premier. Or on obtient alors une déviation de 10° : donc à une intensité *double* correspond une *déviation double*. En faisant passer de la même manière, dans l'appareil, des courants d'intensités croissantes jusqu'à un multiple déterminé de l'intensité initiale, on obtiendra des déviations caractéristiques de chacune de ces intensités. Or on constate que *jusqu'à 20° les déviations sont proportionnelles à l'intensité du courant* et qu'au delà de 20° elles croissent moins vite que l'*intensité*. On n'a qu'à déterminer de distance en distance les déviations correspondantes à des intensités connues et l'on achève la table des intensités successives par la méthode des interpolations. Chaque galvanomètre exige une table particulière; car la relation entre l'intensité du courant et la déviation des aiguilles varie avec leur degré d'aimantation, leur distance du courant, et avec le nombre des tours du circuit.

Remarque. — 1° Le galvanomètre muni d'un multiplicateur à deux fils sert encore à mesurer la différence d'intensité de deux courants; ce qui s'obtient en faisant passer simultanément, en sens contraire, un courant dans chaque fil : la déviation est évidemment due à la différence des actions et mesure, par suite, la différence des intensités. C'est pour cela qu'on appelle l'appareil *galvanomètre différentiel*.

2° On gradue aussi facilement le galvanomètre à l'aide des courants thermoélectriques, et en vue des mesures calorifiques. L'appareil fait alors partie d'un thermomultiplicateur : nous verrons à propos de ce dernier instrument cet autre mode de graduation.

1080. **Galvanomètre de Thomson.** — S. W. Thomson a construit, pour les mesures de précision des courants faibles, un galvanomètre à sensibilité variable qui diffère du précédent : 1° par le principe du système astatique; 2° par la forme du multiplicateur.

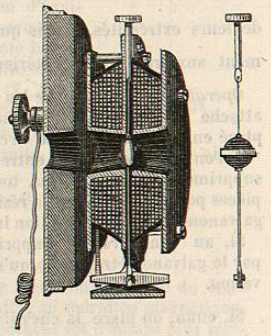

Fig. 1002.

Nous avons vu précédemment qu'on pouvait rendre une aiguille aimantée astatique en plaçant convenablement dans son voisinage un barreau aimanté. C'est le procédé employé par Thomson. L'aiguille aimantée est unique, très courte (3 millim.) et suspendue par un ou plusieurs fils sans torsion au centre du multiplicateur. Celui-ci est renfermé dans une boîte cylindrique (fig. 1002), sur laquelle se dresse une tige verticale : c'est sur cette tige qu'on peut déplacer et orienter à volonté le barreau directeur *a*, de manière à affaiblir à volonté l'action terrestre et faire varier ainsi l'astaticité de l'aiguille et la sensibilité de l'instrument.

Quant au multiplicateur, la forme en est assez compliquée, parce qu'elle a été calculée, d'après la formule d'Ampère, de manière à produire sur l'aiguille le maximum d'effet. Les déviations étant très petites, on les observe par la méthode de réflexion.

Nous reviendrons sur cet instrument à propos de son emploi dans la télégraphie transatlantique.

1081. **Shunt des galvanomètres.** — Le *shunt* est un appareil employé dans les mesures galvanométriques toutes les fois que l'instrument est très sensible

et que l'intensité du courant serait assez forte pour le détraquer. Le *shunt* permet de faire passer à volonté dans le galvanomètre $\frac{1}{10}$, ou $\frac{1}{100}$, ou $\frac{1}{1000}$ du courant, ou bien le courant tout entier, ou enfin pas du tout de courant.

Description. — Il se compose d'une série de trois bobines de fil conducteur, dont les résistances sont respectivement égales à $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$ et $\frac{1}{999}$ de *la résistance du galvanomètre* particulier (avec lequel il doit servir pour les mesures). Elles sont renfermées dans une boîte cylindrique en métal (fig. 1005), dont le couvercle est une plaque isolante en ébonite. Six pièces métalliques, de résistance négligeable à cause de leur épaisseur, sont disposées sur la plaque, comme l'indique la figure : elles sont normalement isolées entre elles par l'ébonite, sauf la pièce centrale CA, qui est reliée métalliquement avec la pièce postérieure de droite. Les trois pièces antérieures peuvent être mises en communication avec la pièce centrale, et, par suite, avec la pièce postérieure droite, à l'aide de chevilles métalliques; on peut relier de même, à volonté, les deux pièces postérieures. Celles-ci sont munies de deux bornes métalliques : à celle de gauche sont reliées les trois bobines par l'une de leurs extrémités, tandis que les trois autres bouts aboutissent séparément aux trois pièces antérieures marquées $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$.

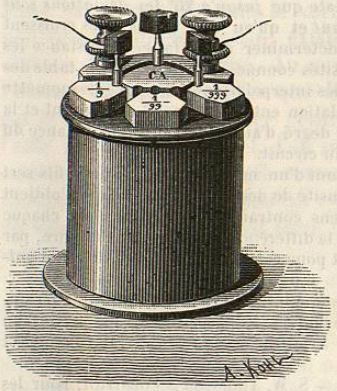

Fig. 1005.

Opération. — On attache les fils du circuit de la pile aux deux bornes. On y attache aussi les deux rhéophores du galvanomètre : l'instrument est alors placé en dérivation dans le circuit.

Si l'on met une cheville entre les deux pièces postérieures du shunt, et qu'on supprime toutes les autres, tout le courant passe par l'ensemble des deux pièces postérieures, dont la résistance est négligeable, et il n'en passe dans le galvanomètre qu'une fraction insensible.

Si, au contraire, on supprimait la cheville, tout le courant passerait par le galvanomètre, parce qu'il y aurait une interruption dans l'autre dérivation.

Si, enfin, on place la cheville entre la pièce CA et la pièce $\frac{1}{9}$, par exemple, le courant passera alors dans deux circuits dérivés, l'un constitué par le galvanomètre, et l'autre par la bobine du shunt (de résistance égale à 1/9 de celle du galvanomètre). Les intensités i' et I_1 des deux courants dérivés seront donc déterminées par l'équation

$$i' = I_1 \frac{r'}{r + r'},$$

r' étant la résistance de la bobine et r celle de l'instrument. Or, en faisant

successivement

$$r' = \frac{r}{9} \quad \text{ou} \quad \frac{r}{99} \quad \text{ou} \quad \frac{r}{999},$$

on a bien

$$i' = \frac{I_1}{10} \quad \text{ou} \quad \frac{I_1}{100} \quad \text{ou} \quad \frac{I_1}{1000}.$$

1082. **Boussole des tangentes.** — 1° *Description et principe.* — Cet appareil, inventé par Pouillet, permet de mesurer directement les intensités de courants en unités absolues. Il se compose essentiellement d'une aiguille aimantée mobile dans un plan horizontal. Son pivot vertical est disposé au centre d'un cadre en bois ou d'un cercle en cuivre, sur lequel est enroulé un fil métallique. L'aiguille est très courte par rapport au cadre. Quand cette condition est remplie, et que l'aiguille se trouve dans le plan du cadre, les actions d'un courant qui circule dans le fil se réduisent à deux forces égales et contraires, appliquées aux deux pôles de l'aiguille et perpendiculaires au plan du cadre, et par suite à la direction initiale de l'aiguille.

Cela peut se démontrer par le calcul à l'aide des formules d'Ampère.

2° *Opération.* — On amène le cadre dans le méridien magnétique de manière que le cadre et l'aiguille soient dans un même plan. On fait alors passer le courant. L'aiguille aimantée, sollicitée par un couple perpendiculaire à sa direction, est déviée de sa position d'équilibre, c'est-à-dire du méridien magnétique. Mais à mesure qu'elle s'en éloigne, l'effet de la composante horizontale du couple terrestre grandit et, comme l'action du courant reste constante, il arrive nécessairement un moment où ces deux forces contraires se font équilibre. A ce moment, l'aiguille aimantée reste en équilibre dans un azimut α.

Fig. 1004.

3° *Équation d'équilibre.* — Soit $a'b'$ la position d'équilibre (fig. 1004). Soient T et F les actions de la terre et du courant sur le pôle austral. Les actions sur le pôle boréal sont égales et contraires, de sorte que l'aiguille est en équilibre sous l'action des deux couples $(F_1, -F)$, $(T_1, -T)$, dont les moments sont : pour T, $T \cdot 2l \sin \alpha$, et pour F, $F \cdot 2l \cos \alpha$. Il suffit d'exprimer que les moments de ces deux couples sont égaux et de signe contraire, et, par suite, que leur somme algébrique est nulle. On a

$$T \cdot 2l \sin \alpha - F \cdot 2l \cos \alpha = 0,$$

d'où

$$F = T \operatorname{tang} \alpha.$$

Cette équation d'équilibre suppose que l'action électromagnétique du courant est restée perpendiculaire au cadre, c'est-à-dire au méridien magnétique, quoique l'aiguille soit sortie de ce plan. Cette hypothèse est d'autant plus légitime que l'angle α est plus petit et que le rayon du cadre est plus grand par rapport à l'aiguille. — D'où la nécessité d'avoir une aiguille courte et un large cadre.

En faisant passer un autre courant dans la boussole, l'action F' serait donnée par l'équation

$$F' = T \operatorname{tang} \alpha',$$

d'où

$$\frac{F}{F'} = \frac{\operatorname{tang} \alpha}{\operatorname{tang} \alpha'}.$$

Si l'on considère les actions électromagnétiques des courants comme étant proportionnelles à leurs intensités, on pourra écrire $\frac{F}{F'} = \frac{I}{I'} = \frac{\text{tang } \alpha}{\text{tang } \alpha'}$, et, en général, $I = K \text{ tang } \alpha$.

L'expérience confirme cette manière de voir. En effet, si l'on place successivement un même voltamètre dans les deux courants, et qu'on pèse les quantités p et p' d'hydrogène qui se dégagent dans l'unité de temps, on trouve que $\frac{p}{p'} = \frac{\text{tang } \alpha}{\text{tang } \alpha'}$. Or on sait que $\frac{p}{p'} = \frac{I}{I'}$, I et I' étant les intensités électrochimiques : donc *les actions électromagnétiques sont proportionnelles aux intensités électrochimiques et, par suite, aux quantités d'électricité qui circulent dans la fil.*

1083. **Boussole de Weber.** — On substitue quelquefois la boussole de Weber à la boussole des tangentes. Dans cet instrument, le cadre est beaucoup moins grand : ce qui rend l'action du courant plus efficace (puisqu'on diminue la distance) et par suite l'appareil plus sensible ; mais pour que l'appareil ne cesse pas d'être exact, on doit n'observer que de très petites déviations (au plus égales à 1° ou 2°). Pour mesurer avec précision, on emploie le dispositif du miroir de Gauss.

1084. **Mesure des constantes d'une pile.** — 1° *Définition.* — Quels que soient le nombre des éléments d'une pile et leur mode de couplage, nous avons vu que les lois de Pouillet et la formule d'Ohm ne cessent pas de s'y appliquer. On a donc entre l'intensité I du courant, la force électromotrice E de la pile, sa résistance intérieure R et la résistance r du circuit extérieur l'équation générale

$$I = \frac{E}{R + r}.$$

Nous avons dit que E et R s'appellent les *constantes* de la *pile*.

2° *Mesure de* R. — Le procédé le plus simple est le suivant :

On interpose entre les pôles de la pile un circuit de résistance connue r, puis on fait passer le courant dans une boussole des tangentes de résistance négligeable; on a une déviation α : d'où l'équation

$$K \text{ tang } \alpha = \frac{E}{R + r}.$$

Répétons cette expérience en faisant varier la résistance extérieure, qui devient r', nous aurons une nouvelle déviation α', d'où l'équation

$$[2] \qquad K \text{ tang } \alpha' = \frac{E}{R + r'}.$$

En divisant ces équations membre à membre, il vient

$$\frac{\text{tang } \alpha}{\text{tang } \alpha} = \frac{R + r'}{R + r} \quad \text{et} \quad \frac{\text{tang } \alpha}{\text{tang } \alpha' - \text{tang } \alpha} = \frac{R + r'}{r - r'}.$$

Tout est connu dans cette équation, sauf R. Nous en déduirons la valeur de R en fonction de r et de r', en unités de résistance ordinaires.

3° *Mesure de* E. — 1° Connaissant R, nous n'aurons qu'à porter sa valeur dans l'équation [1] pour en déduire E, qui sera exprimé en unités d'intensité.

4° On peut aussi mesurer la force électromotrice en fonction d'une autre force électromotrice connue e. Pour cela, on fait agir successivement dans un courant de grande résistance r, contenant une boussole ou un galvanomètre, la pile dont la force électromotrice est E et la résistance intérieure R, puis la pile-type (e, ρ); on a successivement

$$I = \frac{E}{R + r} \quad \text{et} \quad I' = \frac{e}{\rho + r}, \quad \text{d'où} \quad \frac{E}{e} = \frac{I(R + r)}{I'(\rho + r)}.$$

Si les résistances intérieures sont petites par rapport à r, la formule se simplifie, car alors $R + r$ et $\rho + R$ sont sensiblement égaux. On a alors $E = e\frac{I}{I'}$.

Remarque. — Ces méthodes de mesure donnent la force électromotrice *effective* de la pile, c'est-à-dire la différence entre sa force électromotrice vraie et sa force électromotrice inverse de *polarisation*. On peut d'ailleurs obtenir la force électromotrice vraie, c'est-à-dire dégagée de la polarisation, en la mesurant quand le circuit de la pile est ouvert : comme alors il n'y a pas de courant, il n'y aura pas de polarisation. On sait que la force électromotrice est égale à la différence des potentiels aux deux pôles : on n'a qu'à mesurer cette différence à l'aide d'un électromètre.

1085. **Mesure des résistances.** — On applique le cas de dérivation connu sous le nom de *pont de Wheatstone* à la mesure des résistances. C'est le procédé le plus commode et le plus employé.

1° *Principe de la méthode.* — On appelle pont de Wheatstone une dérivation assez compliquée, qui a la forme *schématique* d'un losange avec deux diagonales (fig. 1005). La grande diagonale est placée en dehors du losange : elle contient la pile (ou le contact électromoteur); la petite diagonale constitue à proprement parler le *pont*.

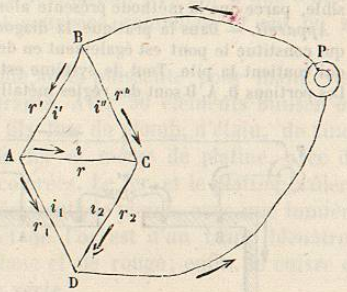

Fig. 1005.

Le courant vient du pôle positif de la pile et y revient après avoir parcouru les cinq conducteurs du losange, comme l'indiquent les flèches. On voit que le courant doit circuler dans le *pont* aussi bien de A vers C que dans le sens inverse; l'effet résultant dépend des intensités relatives des courants ou, si l'on veut, de la valeur du potentiel en A et en C. Nous figurons seulement le sens du courant qui est le plus intense.

La seule valeur importante à trouver au point de vue des applications, c'est l'intensité i du courant qui circule dans le *pont*, en fonction de l'intensité I_1 du courant principal et des résistances r', r'', r_1, r_2 des branches du pont. En appliquant les formules de dérivation indiquées ci-dessus (1001), on arrive à la formule suivante :

$$i = \frac{I_1 [r'r_2 - r''r_1]}{(r' + r'')(r_1 + r_2) + r(r' + r'' + r_1 + r_2)}.$$

On voit que, si les résistances des quatre côtés sont choisies de manière que l'on ait

$$r'r_2 - r''r_1 = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{r'}{r''} = \frac{r_1}{r_2},$$

on aura $i = 0$, c'est-à-dire qu'il ne passera pas de courant dans le pont et qu'un galvanomètre intercalé dans ce pont restera au zéro. C'est ce cas particulier qui est utilisé.

2° *Application de la méthode.* — Imaginons qu'on forme les deux côtés BA et BC avec deux bobines de résistance qu'on peut rendre équivalentes; qu'en CD on place un *rhéostat* R, c'est-à-dire *un conducteur de résistance variable et constamment connue*, et en AD la résistance inconnue x ; et enfin un galvanomètre dans le pont.

On modifie alors les résistances variables jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre reste au zéro. A ce moment le courant dérivé du pont est nul, et l'on a

$$r' r_2 - r'' x = 0, \quad \text{d'où} \quad x = \frac{r' r_2}{r''}.$$

On aura immédiatement x en fonction des trois résistances connues.

Remarque. — Pour faire plus commodément l'expérience, on prend quelquefois $r' = r''$: il suffit pour cela d'avoir deux bobines de résistance *équivalentes*. On place ensuite la résistance à mesurer entre A et D et l'on fait varier la longueur du fil d'un *rhéostat* qu'on place entre B et D, jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre soit ramenée au zéro.

Comme $r'' = r'$, l'équation ci-dessus se réduit à

$$x = r_2.$$

On a avantage à rendre les trois résistances r', r'', r_1 aussi égales que possible, parce que la méthode présente alors son maximum de sensibilité.

Appareil. — Dans la pratique, la diagonale qui contient le galvanomètre et qui constitue le pont est également en dehors du losange, comme la diagonale qui contient la pile. Tout le système est disposé sur une table horizontale. Les portions B, A, D sont des règles métalliques (fig. 1006) de résistances négli-

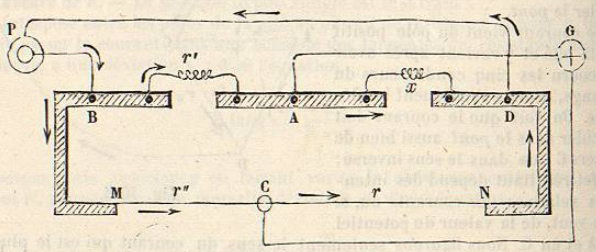

Fig. 1006.

geables, portant en B, A, D des poupées qui servent à attacher les fils des bobines. On attache en r' une boîte de résistance connue (sur le côté BA) ; en x on met la résistance à mesurer (AD). MN est un *rhéostat de Pouillet*, c'est-à-dire un simple fil de platine tendu, que le curseur C divise en deux portions qui forment les côtés BC et CD.

La manipulation est des plus simples. On n'a qu'à faire mouvoir le curseur D jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre reste au zéro. A ce moment, on a l'équation d'équilibre ci-dessus, d'où l'on tire

$$\frac{x}{r'} = \frac{r}{r''}.$$

CHAPITRE IX

EFFETS CALORIFIQUES ET LUMINEUX DES COURANTS VOLTAÏQUES. THERMO-ÉLECTRICITÉ.

1086. **Phénomènes généraux.** — 1° *Fusion et volatilisation des solides.* — Un courant qui parcourt un fil métallique y produit des effets analogues à ceux des décharges de batteries : le fil s'échauffe, devient incandescent, fond ou se volatilise, selon qu'il est plus ou moins long et d'un diamètre plus ou moins fort. Avec une pile puissante, tous les métaux, même l'iridium et le platine, sont fondus. Le charbon est le seul corps qui ait été réfractaire à la fusion par les courants. Cependant Despretz, avec une pile en batterie formée de six séries parallèles de 100 éléments Bunsen chacune, a porté des baguettes de charbon très pur à une température telle, qu'elles se sont courbées, ramollies, et ont pu se souder ensemble.

Il n'est pas besoin d'une pile aussi puissante pour manifester les effets calorifiques des courants. Avec 30 éléments Bunsen on peut fondre et volatiliser des fils fins de plomb, d'étain, de zinc, de cuivre, d'or, d'argent, de fer et même de platine, avec de vives étincelles diversement colorées. Le fer et le platine brûlent avec une lumière d'un blanc éclatant; le plomb, avec une lumière purpurine; celle de l'étain et de l'or est d'un blanc bleuâtre; celle du zinc est mêlée de blanc et de rouge; enfin, le cuivre et l'argent donnent une lumière verte.

2° *Échauffement des liquides.* — Le passage du courant à travers un liquide l'échauffe aussi, et d'autant plus, que le courant est plus intense et que le liquide est moins bon conducteur. Ce dégagement de chaleur est plus difficile à observer dans les liquides, parce qu'ils ont une plus grande chaleur spécifique que les solides, et que les gaz produits absorbent une grande quantité de chaleur latente. Par exemple, dans la décomposition de l'eau, on constate que l'élévation de température est moindre au pôle négatif qu'au pôle positif : or on sait que le volume de l'hydrogène qui s'y dégage est double du volume d'oxygène qu'on recueille au pôle positif.

1087. **Lois de Joule.** — Les lois de ces phénomènes ont été découvertes par Joule. Il les a vérifiées au moyen d'un calorimètre spécial