

avons signalées, mais avec cette particularité que les tubes qu'il emploie ne sont pas placés dans le circuit comprenant le fil secondaire de la bobine : il met le tube en communication avec une des extrémités de ce fil seulement, le tube ne comporte qu'une électrode, et la seconde extrémité du fil de la bobine reste inutilisée.

Dans un autre cas, le tube présente deux électrodes, mais l'une d'elles seulement est reliée à la bobine : l'illumination est la plus forte près de cette extrémité ; mais si on relie l'autre électrode à une lame métallique isolée, le tube s'éclaire uniformément et plus vivement.

Le fil de la bobine est relié à un fil métallique recouvert d'une couche isolante autour de laquelle se trouve une gaine en plomb qui, par conséquent, n'est pas en communication avec la bobine. Cependant on obtient des effets semblables à ceux dont nous venons de parler en touchant, non le fil intérieur, mais la gaine de plomb.

Signalons pour terminer le fait suivant : une plaque métallique de grande surface est mise en communication avec l'une des extrémités du fil secondaire de la bobine induite et participe, par conséquent, aux variations énormes et très rapides de potentiel que présente ce fil. Cette lame produit, jusqu'à une certaine distance, un champ électrique présentant des variations analogues. Il suffit de placer un tube vide, comme ceux de Crookes, dans le voisinage de cette lame pour qu'il s'illumine dans toute son étendue.

Nous ne chercherons pas à expliquer ces effets qui, d'ailleurs, ne sont pas en contradiction avec les notions qu'ont fournies les expériences de Hertz ; mais ils sont assez intéressants, assez remarquables, pour que nous ayons cru nécessaire de les signaler sommairement.

## CHAPITRE VIII

### APPAREILS ET MÉTHODES DE MESURE

992. — Nous avons admis au début de l'étude de l'électricité que l'on avait les moyens de mesurer les divers éléments dont la connaissance était nécessaire ; il n'était pas possible alors de décrire les appareils employés, car les lois sur lesquelles ils sont basés n'avaient pas été énoncées. Nous pouvons maintenant aborder cette description, en nous bornant d'ailleurs aux appareils employés dans les recherches physiologiques.

Les éléments que l'on peut avoir à déterminer relativement à l'électricité sont au nombre de cinq : la différence de potentiel, l'intensité du courant, la quantité d'électricité, la résistance, la capacité.

Nous ne nous occuperons pas de la capacité qui jusqu'à présent n'a pas été introduite ordinairement dans les questions que nous avons à traiter ; ajoutons d'ailleurs que, sauf pour les mesures qui sont d'un usage courant, nous nous bornerons à indiquer le principe des méthodes employées, sans entrer dans le détail des appareils.

Nous commencerons par l'étude des moyens de mesure de l'intensité des courants.

993. **Galvanomètres. Ampèremètres.** — Les appareils destinés à comparer et à mesurer l'intensité des courants ont reçu le nom de *galvanomètres* ; ils reposent sur les déplacements subis par les aiguilles aimantées ou les courants mobiles dans les champs magnétiques : galvanomètres à aiguille, galvanomètres à cadre.

Le galvanomètre à aiguille repose sur l'expérience d'Oersted (852), la déviation de l'aiguille aimantée par le passage d'un courant dans un conducteur voisin. On augmente l'effet en plaçant l'aiguille *ab* (fig. 484) dans un cadre ABCD traversé par le courant : on reconnaît immédiatement en appliquant la règle d'Ampère (852) que les actions des divers côtés du cadre sont concourantes et tendent toutes à faire dévier l'aiguille dans le même sens. On augmente encore l'effet

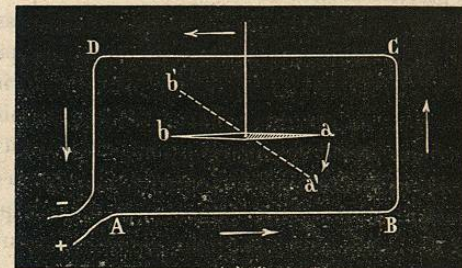


Fig. 484.

en faisant faire au fil plusieurs tours sur le cadre dans lequel est placé l'aimant : c'est le principe du *multiplicateur* de Schweigger.

Le cadre étant au préalable placé dans la direction du méridien magnétique, l'aiguille prend cette même direction lorsque le courant ne passe pas ; lorsque le courant est établi, l'aiguille est déviée et, comme nous l'avons dit, sa déviation dépend de l'intensité du courant et renseigne sur la valeur de celle-ci.

La force émanée du courant étant perpendiculaire au cadre, pour un même courant, la déviation, qui dépend de celle-ci et de l'intensité du champ magnétique, sera d'autant plus grande que la force due à l'action du champ magnétique sera plus faible. On diminue cette action en rendant l'aiguille astatique (798), soit en plaçant dans le voisinage un aimant convenablement disposé, soit en ayant recours à un système d'aiguilles astatiques *ab, a'b'* (fig. 485). Mais dans ce cas, il importe de remarquer qu'il ne faut pas mettre le système des deux aiguilles dans l'intérieur du cadre, car les actions du courant sur ces aiguilles s'exerceraient en sens contraire et s'annuleraient ou à peu près : il faut placer



une des aiguilles  $ab$  à l'intérieur du cadre et l'autre  $a'b'$  à l'extérieur. L'application de la règle d'Ampère montre que l'action de CD sur l'aiguille

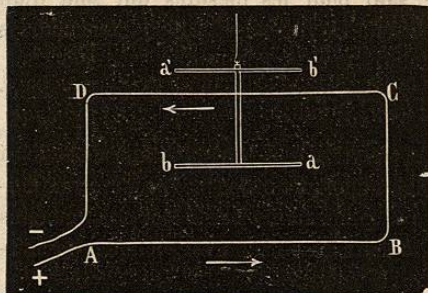


Fig. 485.

$a'b'$  s'ajoute aux actions subies par  $ab$ ; il est vrai que les actions de AB, BC et DA sont en sens contraire, mais elles sont moins importantes à cause de leur plus grand éloignement.

Il importe de remarquer qu'il faut arriver à peu près à l'astaticité pour avoir un appareil sensible : il ne conviendrait pas au point de

vue théorique de rechercher l'astaticité absolue. D'une part, il ne serait pas possible de faire des mesures ou des comparaisons d'intensité, car toujours l'aiguille serait déviée en croix par le passage du courant; d'autre part, l'aiguille une fois déviée ne reviendrait pas d'elle-même à sa position primitive lorsque le courant

cesserait de passer.

Il est vrai que, dans la réalité, il y a à tenir compte d'une force autre que celle résultant de l'action du champ magnétique pour ramener l'aiguille ou le système dans la position primitive : c'est la torsion du fil auquel la partie mobile est suspendue. Aussi n'y a-t-il aucun inconvénient à chercher à réaliser l'astaticité la plus complète possible.

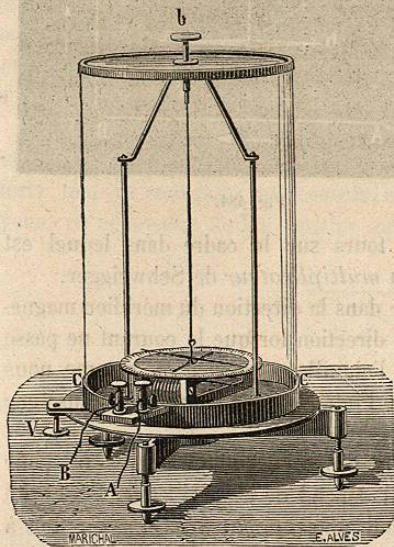


Fig. 486.

994. — Le galvanomètre de Nobili (fig. 486) comprend un système d'aiguilles astatiques, placées comme nous l'avons dit par rapport à un cadre dont les extrémités du fil aboutissent à deux bornes, et suspendu à un fil fin sans torsion fixé à son extrémité supérieure par le bouton  $b$ . L'aiguille supérieure se meut sur un cadran divisé en degrés. Tout le système repose sur un plateau circulaire CC que l'on peut rendre horizontal à l'aide de vis calantes et sur lequel il peut tourner de manière à amener le cadre dans la direction du méridien magnétique, ce dont on

est assuré parce que l'aiguille est alors au zéro de la graduation. On fait aboutir aux bornes les extrémités A et B du circuit que l'on veut étudier : s'il y a un courant, l'aiguille est immédiatement déviée.

Il n'existe aucune relation simple entre l'angle dont l'aiguille est déviée et l'intensité du courant; aussi les indications de ce galvanomètre font-elles connaître seulement si l'intensité d'un courant croît ou décroît, si un courant est plus fort qu'un autre.

On a fait usage dans diverses circonstances de galvanomètres différentiels : leur construction est analogue à celles de l'appareil que nous venons de décrire, seulement sur le cadre sont enroulés deux fils aussi identiques que possible et dont les extrémités aboutissent à quatre bornes. On peut utiliser soit un seul fil, soit les deux et, dans ce cas, on peut y faire passer des courants de même sens ou des courants de sens contraire : il est donc possible d'observer la somme ou la différence des effets produits par les courants, ce qui permet d'établir empiriquement une relation entre les déviations et les intensités.

995. — Lorsqu'on introduit un galvanomètre dans un circuit, on augmente la résistance et, par suite, on diminue l'intensité même du courant qu'on veut mesurer : il y a donc intérêt à prendre un galvanomètre aussi peu résistant que possible, c'est-à-dire dont le fil a une faible longueur et une grande section. Mais, d'autre part, pour une intensité donnée du courant, la grandeur de l'action augmente avec le nombre des tours, de telle sorte que cette considération tendrait à faire prendre un fil long pour avoir un grand nombre de tours, et un fil fin pour que les tours successifs soient le plus rapprochés possible de l'aiguille. On arrive donc par ces deux considérations, importantes l'une et l'autre, à des conditions incompatibles. On décide entre les deux d'après la résistance du reste du circuit : si elle n'est pas très grande, il faut employer absolument un galvanomètre peu résistant pour ne pas trop affaiblir le courant; si la résistance extérieure est très grande, on peut sans inconvénient employer un galvanomètre très résistant, et l'on bénéficie alors de l'augmentation d'action due au grand nombre des spires.

996. — Dans les recherches qui demandent quelque précision on a renoncé à l'emploi du galvanomètre donnant de grandes déviations et on emploie des galvanomètres basés sur le même principe, mais dont les déviations restent très petites : elles produisent cependant des effets très appréciables par l'emploi du système à miroir que nous avons décrit dans un autre chapitre (366).

Les galvanomètres qui sont maintenant le plus en usage à ce point de vue sont ceux de Thomson et de Wiedemann.

Le galvanomètre de sir William Thomson (fig. 487) comprend un système magnétique formé de petits barreaux très courts et très minces, très légers par conséquent, collés derrière un miroir en verre argenté H



de 2 centimètres environ de diamètre. Ce miroir, suspendu à un fil sans torsion, est placé dans la partie centrale d'une bobine qui sera traversée par le courant. Sur une tige T qui surmonte l'appareil on peut fixer à l'aide d'une vis de pression un barreau aimanté NS à diverses hauteurs et dans différentes directions, de manière à obtenir l'astaticité. En face de l'appareil sont une lampe et une règle divisée; la lumière réfléchie par le miroir donne sur la règle une tache lumineuse dont le déplacement renseigne sur l'intensité du courant, si on a eu soin de faire, au préalable, des mesures avec des courants d'intensité bien déterminée.

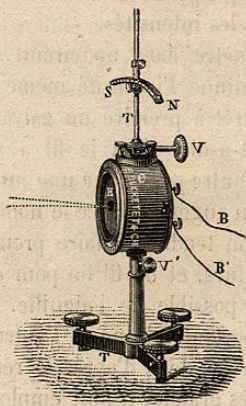


Fig. 487.

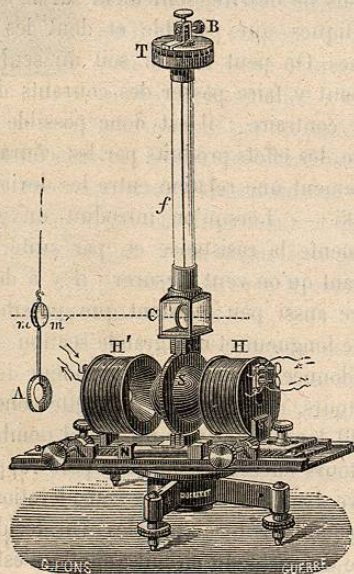


Fig. 488.

La boussole de Wiedemann (fig. 488) comporte un système astatique formé de deux barreaux aimantés réunis par une tige rigide suspendue à un fil sans torsion et portant un miroir *m*. Le barreau inférieur *A* se meut à l'intérieur d'une sphère creuse en cuivre rouge *S* : cette disposition, basée sur l'induction (962), a pour effet d'arrêter rapidement les oscillations, de les amortir, de rendre le galvanomètre apériodique. Le cadre est remplacé par deux bobines *H, H'*, placées de part et d'autre de la sphère, et mobiles sur des coulisses, de manière à pouvoir en être plus ou moins approchées, suivant le degré de sensibilité qu'on veut donner à l'appareil; il existe deux paires de bobines que l'on peut substituer l'une à l'autre, suivant les conditions de l'expérience, une à gros fil et l'autre à fil fin.

La lecture des déviations se fait comme dans l'appareil précédent.

997. — On désigne sous le nom de *galvanomètres étalonnés* des appareils dans lesquels les indications fournies font connaître à simple lecture la valeur de l'intensité du courant en unités pratiques. Ils reposent sur ce fait que, dans un champ magnétique donné, pour un circuit donné de forme et de dimensions, la déviation produite par un courant d'intensité déterminée est fixe et indépendante de l'aimantation plus ou moins forte de l'aiguille. Ce fait tient à ce que la direction que prend l'aiguille dépend du rapport des forces qu'elle subit de la part du champ magnétique et de celle du courant; ces deux forces sont l'une et l'autre proportionnelles à l'aimantation de l'aiguille, dont la valeur disparaît dans le rapport.

On désigne sous le nom d'*ampéremètres* les appareils étalonnés destinés à mesurer l'intensité du courant : il existe des ampéremètres permettant de mesurer des courants de grande intensité comme ceux employés dans l'industrie, mais nous nous occuperons seulement de ceux employés en médecine où l'on ne fait usage que de faibles intensités : ces intensités sont évaluées en milliampères, c'est-à-dire en millièmes d'ampère.

Les ampéremètres les plus usités sont de simples multiplicateurs, comprenant un cadre *M* (fig. 489) dans lequel on fait passer le courant et une aiguille aimantée montée sur pivot et placée à l'intérieur du cadre; une aiguille en aluminium, placée perpendiculairement à l'aiguille aimantée dont elle est solidaire, se déplace sur un cadran divisé *G*. En général, le cadre a une forme spéciale déterminée de manière à rendre moins sensibles les différences de grandeur entre les divisions parcourues par l'aiguille dans les diverses parties de l'échelle. Le cadre et le cadran divisé sont mobiles sur la base *C* de l'appareil où sont placées les bornes *S, S'*, auxquelles on attache les extrémités des fils du circuit de manière à pouvoir amener le cadre dans la direction du méridien magnétique, ce dont on est averti parce que l'index est alors en face du zéro de la graduation.

Les courants employés en médecine doivent rarement dépasser 30 milliampères; aussi la plupart des ampéremètres médicaux ont une graduation limitée à 50 milliampères. Il est nécessaire quelquefois, cependant, d'avoir une graduation plus étendue, car dans certaines applications, pour la cure des fibromes de l'utérus, on a dépassé l'intensité de 150 milliampères.

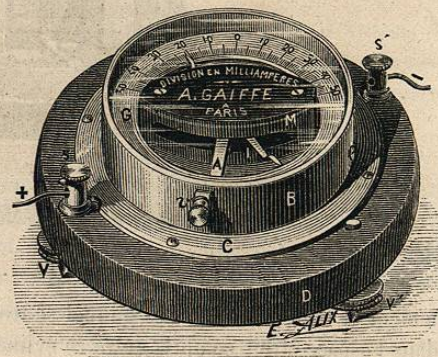


Fig. 489.



998. — Les galvanomètres à cadre sont basés sur la direction stable que prend, dans un champ magnétique, un circuit mobile parcouru par un courant. Le modèle le plus employé est le galvanomètre Deprez-d'Arsonval. Il comprend en principe un aimant en U (fig. 490) placé vertica-

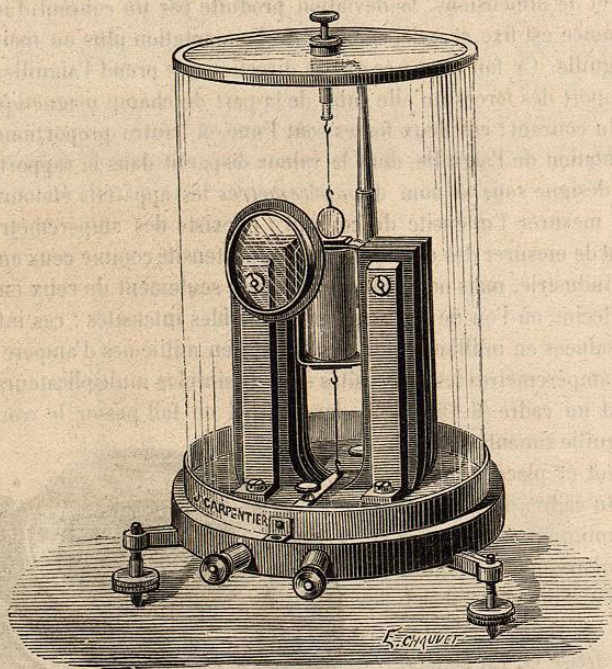


Fig. 490.

lement et entre les branches duquel se trouve un cylindre de fer doux; dans l'espace étroit compris entre ce cylindre et les branches de l'aimant le champ magnétique est très intense. Un cadre rectangulaire comprenant un ou plusieurs tours d'un fil fin de cuivre est suspendu de manière que ses grands côtés, placés verticalement, se logent dans ces espaces; il peut d'ailleurs tourner autour de l'axe du cylindre et le mode de suspension est tel que le fil est parcouru par le courant que l'on veut mesurer et qui est amené à l'appareil par des fils qu'on fixe à des bornes placées sur la base. Lorsque le courant passe, le cadre est dévié et la déviation, est d'autant plus grande que le courant est plus intense. Ces déviations, qui sont toujours faibles d'ailleurs, sont évaluées à l'aide d'un petit miroir qui est solidaire du cadre dans ses déplacements et sur lequel on fait tomber un faisceau lumineux: le faisceau réfléchi forme, sur une échelle divisée placée à distance, une tache dont les déplacements font connaître l'intensité du courant.

Le galvanomètre est aperiodique, presque immédiatement le cadre prend une position invariable; cette propriété est due à la même cause que celle que nous avons signalée pour la boussole de Wiedemann.

Il existe divers modèles de ce galvanomètre; mais on y retrouve toujours les mêmes éléments qui sont seulement disposés diversement.

Une disposition qui paraît appelée à être utilisée commodément comme ampèremètre est celle du galvanomètre d'Arsonval-Gaiffe (fig. 491): le champ magnétique utilisé est compris entre deux aimants A et A' circulaires presque fermés, et est sensiblement uniforme. Le cadre mobile, qui porte une aiguille se déplaçant sur un cadran, est ramené à une position d'équilibre stable quand le courant ne passe pas, par l'action d'un très léger ressort spiral dont l'élasticité entre en jeu quand le cadre est dévié et, faisant équilibre à la force qui tend à dévier le cadre, amène celui-ci à l'équilibre.

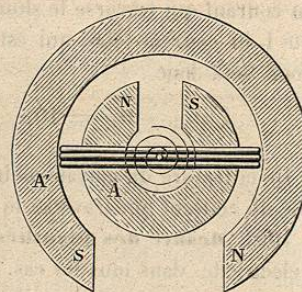


Fig. 491.

999. **Electro-dynamomètres.** — Les appareils dont nous venons de parler ne peuvent être utilisés pour le cas des courants alternatifs, puisque le sens de l'action change à chaque instant. On emploie alors les électrodynamomètres dont nous indiquerons seulement le principe.

Un électro-dynamomètre est formé essentiellement de deux bobines: l'une d'elles, fixe, présente une cavité circulaire en son centre; l'autre suspendue à un fil sans torsion est placée à l'intérieur de la bobine fixe, et dirigée perpendiculairement. Les fils des bobines sont placés dans un même circuit de manière à être parcourus toujours par le même courant.

Lorsqu'un courant passe dans ce circuit, les bobines tendent à se placer parallèlement: la bobine mobile se déplace donc; mais elle est arrêtée à une position, qui dépend de la grandeur de l'action exercée et par suite de l'intensité du courant, par la torsion qui se produit dans le fil de suspension.

Les variations de sens qui se produisent dans les courants alternatifs n'ont pas d'influence sur cette position d'équilibre, parce que le changement se faisant à la fois dans les deux bobines, l'action mécanique conserve le même sens.

1000. — Il arrive assez fréquemment que les courants à mesurer ont une intensité trop forte pour le galvanomètre dont on dispose: on peut cependant se servir de cet appareil par l'emploi d'un *shunt*, conducteur qui relie directement les bornes du galvanomètre; entre ces bornes il existe ainsi une dérivation à deux branches entre lesquelles le courant total se divise, une partie passant à travers le shunt, l'autre à travers le



galvanomètre. D'après ce que nous avons dit (860), on sait que, dans ce cas, les intensités dans les deux branches de la dérivation sont inversement proportionnelles aux résistances de ces branches. Si donc on connaît celles-ci, on peut déduire l'intensité du courant total de celle du courant qui traverse le galvanomètre.

Généralement le shunt a une résistance qui est  $\frac{1}{9}$  ou  $\frac{1}{99}$  de la résistance du galvanomètre : l'intensité lue sur le galvanomètre étant  $i$ , celle du courant qui traverse le shunt sera  $9i$  ou  $99i$  suivant le cas. L'intensité  $I$  du courant total, qui est la somme des courants dans les dérivation, sera donc :

$$I = i + 9i = 10i \quad \text{ou} \quad I = i + 99i = 100i.$$

De la lecture du galvanomètre on déduit donc immédiatement l'intensité du courant qui traverse le circuit extérieur.

**1001. Mesure des quantités d'électricité.** — La mesure des quantités d'électricité, dans tous les cas, peut se déduire de l'électrolyse : on détermine, par exemple, l'électrolyse d'un sel de cuivre ou d'argent à l'aide d'électrodes constituées par le métal du sel même. Nous savons que, dans ce cas, l'effet est le même que s'il y avait seulement transport du métal d'une électrode à l'autre. Deux pesées d'une même électrode faites, l'une au début, l'autre à la fin de l'expérience, font connaître le poids du métal transporté. On en déduit la quantité d'électricité qui a produit l'action chimique, puisque l'on sait que 1 coulomb met en liberté  $1\text{mgr},418$  d'argent ou  $0\text{mgr},327$  de cuivre.

Si le courant est constant, on peut déterminer la quantité d'électricité  $Q$  d'après la relation

$$Q = I t.$$

Il suffit alors de mesurer  $I$  à l'aide d'un galvanomètre et de noter, en secondes, la durée de l'expérience.

Dans quelques circonstances, il est utile de mesurer la quantité d'électricité correspondant à l'action d'un courant de très courte durée, à la décharge d'un condensateur. On peut encore utiliser le galvanomètre; dans ce cas, le galvanomètre n'atteint pas une position stable d'équilibre, il subit une déviation et revient immédiatement à sa position primitive. On démontre qu'il existe une relation entre la quantité d'électricité qui a passé et l'écart maximum, si la durée du passage est très courte : la lecture de cet écart fait connaître alors la quantité d'électricité.

Le galvanomètre ainsi employé est dit *galvanomètre balistique*.

**1002. Mesure des différences de potentiel. Voltmètres.** — La mesure de la différence de potentiel entre deux points peut se présenter dans des conditions différentes que nous allons examiner successivement,

suivant que ces points font partie d'un circuit traversé par un courant ou non.

Lorsqu'on veut trouver la différence de potentiel entre deux points d'un circuit traversé par un courant, on fait usage d'un galvanomètre étalonné appelé alors *voltmètre*, qu'on place en dérivation entre ces points. Si  $\varepsilon$  est la différence de potentiel entre les deux points,  $\gamma$  la résistance du galvanomètre et  $I$  l'intensité du courant, on sait que l'on a

$$I = \frac{\varepsilon}{\gamma}.$$

Si donc on connaît  $\gamma$ , la connaissance de  $I$  fournie par l'appareil donnera immédiatement la valeur de  $\varepsilon$ ; mais il faut remarquer qu'on aura ainsi la valeur de  $\varepsilon$  alors que le galvanomètre est en place, et que cette valeur n'est pas celle qui existait dans le circuit avant l'interposition du galvanomètre qui établit une dérivation, ce qui change la répartition du potentiel. Il faut donc que l'introduction de cet appareil modifie le moins possible cette répartition, change le moins possible les conditions du courant. On y arrive en donnant au galvanomètre une très grande résistance : nous savons en effet que la dérivation produit peu d'effet dans ces conditions.

En réalité, dans les voltmètres, on ne lit pas  $I$  pour en déduire  $\varepsilon$  : la graduation existant sur l'appareil donne immédiatement, par simple lecture, la différence de potentiel évaluée en volts.

**1003. Électromètre capillaire.** — L'électromètre capillaire de Lippmann est basé sur les modifications qui s'exercent à la surface d'un ménisque de mercure traversé par un courant. Il comprend essentiellement un tube en verre  $A$  (fig. 492) assez long terminé par une partie très effilée; ce tube communique par sa partie supérieure avec un sac de caoutchouc rempli d'air  $T$  que l'on peut comprimer plus ou moins, de manière à faire varier la pression au sommet de la colonne mercurielle : un manomètre à siphon  $H$  permet de mesurer cette pression à chaque instant.

La colonne mercurielle, qui est reliée par un fil de platine à une borne  $a$ , se termine inférieurement dans la partie effilée qui plonge dans de l'eau acidulée d'acide sulfurique, placée dans un vase de verre au fond duquel se trouve une couche de mercure  $B$  qui est reliée par un fil de platine à une seconde borne  $b$ . Enfin, un microscope  $M$  placé horizontalement et muni d'un réticule permet d'observer le ménisque et de s'assurer qu'il reprend toujours exactement la même position.

Pour faire une observation, on commence par régler la pression de manière que le ménisque soit exactement au niveau du réticule. On joint alors les points dont on veut déterminer la différence de potentiel aux deux bornes de l'appareil, de manière que le point qui est au potentiel le