

dérivation du courant qui permet l'équilibre au zéro du galvanomètre. Quand cet équilibre est obtenu c'est que les forces électromotrices des deux branches du circuit se compensent et on a toujours :

$$\frac{r}{R} = \frac{a}{b}$$

d'où

$$r = R \frac{a}{b}$$

Pour $a = b$, $r = R$.

Il existe une infinité d'autres méthodes, mais nous craindrions, en insistant, d'effrayer nos lecteurs qui ont, en général, la terreur des formules algébriques. Nous regrettons même d'être allé déjà si loin.

Nous préférons les renvoyer sur ce sujet à des Traités spéciaux.

Mesure des intensités. — Les appareils de mesure d'intensité se divisent en deux catégories, les voltamètres et les galvanomètres.

Les premiers sont fondés sur les propriétés chimiques des courants, les seconds sur leurs propriétés mécaniques.

Voltamètres : D'après une loi de Faraday, la quantité d'électricité débitée par une décomposition est proportionnelle, pour des mêmes substances, à la quantité d'électrolyte décomposée.

Cette quantité d'électrolyte peut donc servir à mesurer le courant analyseur.

Il peut, en conséquence, y avoir en principe presque autant de genres de voltamètres que la chimie peut compter de décompositions exothermiques.

En pratique, dans tous les voltamètres on mesure la quantité soit d'hydrogène, soit d'oxygène, soit du mélange d'hydrogène et d'oxygène dû à la décomposition d'une solution aqueuse légèrement acidulée ou salée, c'est-à-dire rendue bonne conductrice (fig. 26).

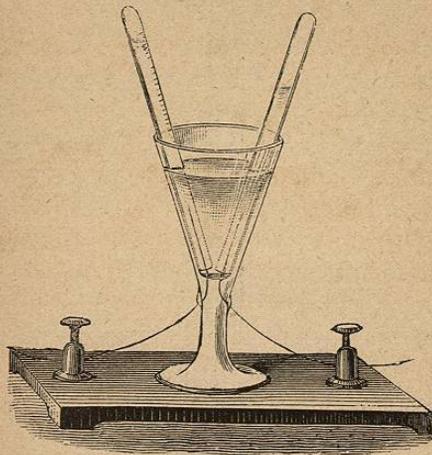


Fig. 26. — Voltamètre.

Il est préférable d'employer le mélange gazeux, car les quantités de matières sur lesquelles on opère sont toujours très faibles, et une petite erreur faite sur elles peut en entraîner une bien plus importante dans l'évaluation du courant électrique.

Parmi les voltamètres conçus dans cette vue, citons celui de Gaiffe (fig. 27).

Il se compose de deux tubes de verre concentriques. L'un, central, est divisé en vingtièmes de centi-

mètre cube et sert à recueillir et à mesurer les gaz produits par la décomposition de l'eau, l'autre contient l'eau. Ils communiquent par leur partie inférieure où viennent aboutir les électrodes.

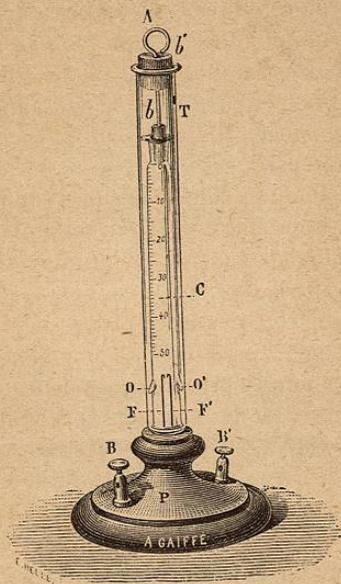


Fig. 27. — Voltamètre de Gaiffe.

Le joule dégage environ par minute 10 centimètres cubes d'hydrogène et oxygène mélangés, c'est-à-dire 10 000 millimètres cubes de gaz.

Le milliampère dégage donc encore 10 millimètres cubes par minute.

Comme chaque division du voltamètre correspond

$\frac{1}{20}$ de centimètres cubes ou à 50 millimètres cubes ; elle indique, par minute, une intensité de 5 milliampères.

Si le voltamètre le cède au galvanomètre sous le rapport de la rapidité de ses indications et de la facilité de la manipulation, il a du moins sur lui l'avantage de totaliser la quantité d'électricité fournie dans un temps quelconque. Ainsi le voltamètre convient bien mieux encore à la mesure de la quantité qu'à celui de l'intensité.

Si, par exemple, dans le cas précédent, on n'a pas à se préoccuper du temps, le coulomb sera mesuré par un volume de gaz de 10 centimètres cubes, grandeur fort appréciable.

Le voltamètre doit encore être préféré au galvanomètre lorsque les courants sont très rapidement variables, comme c'est le cas des courants induits à haute intensité ou des courants successifs.

Galvanomètres. — Avant OErsted, le voltamètre était le seul instrument employé à la mesure des courants. La découverte de la déviation d'une aiguille aimantée sous l'influence de la proximité d'un circuit électrique ne tarda pas à être utilisée par Schweigger pour la mesure des intensités, et grâce à Ampère on put même reconnaître le sens des courants.

Le nouvel instrument qu'on nomma galvanomètre avait pour lui d'être entièrement mécanique et de permettre de comparer par simples lectures directes et permanentes les intensités et les sens de divers courants. Aujourd'hui il remplace presque universellement le voltamètre.

Les galvanomètres sont construits en une infinité de modèles, en rapport avec les usages auxquels ils sont destinés.

Citons d'abord les plus précis qui exigent malheureusement la connaissance de quelques notions algébriques et mécaniques, bien élémentaires il est vrai, et qui, très propres aux études physiologiques, ne peuvent être utilisés dans la pratique médicale, puis nous passerons aux galvanomètres à lecture directe les seuls employés dans la pratique médicale courante.

Comme galvanomètre de haute précision, on se sert de la boussole des tangentes ou de la boussole des sinus (fig. 28).

Sur un cadre circulaire vertical M en cuivre rouge d'un assez grand diamètre, est enroulé un fil isolé de gros calibre, et au centre de ce cadre est une aiguille horizontale, mobile sur un pivot. Cette aiguille se déplace sur un cadran N.

Dès que le courant arrive dans le gros fil, il exerce sur chaque pôle de l'aiguille une force qu'il est facile d'évaluer.

Soit i l'intensité du courant, m l'intensité magnétique du pôle, n le nombre de tours des fils, la longueur de fil influente est :

$$2\pi Rn.$$

La force magnéto-voltaïque a donc pour valeur :

$$f = \frac{i m \cdot 2\pi Rn}{R^2}$$

puisque, d'après la loi de Coulomb, l'induction s'exerce en raison inverse du carré de la distance;

$$\text{ou} \quad f = \frac{2n \pi m i}{R}$$

Cela posé et le courant ne passant pas, orientons

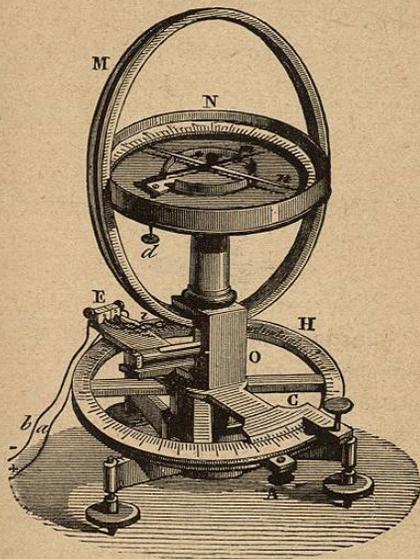


Fig. 28. — Boussole des tangentes et des sinus.

le cadre circulaire dans le méridien magnétique, le zéro du cercle gradué étant mis en regard de l'aiguille, puis laissons arriver le courant : l'aiguille est déviée d'un angle α et se met en équilibre par la compensation de la composante de la force f exercée

par le circuit électrique et de la composante de la force magnétique terrestre M .

La première composante est évidemment, l étant la longueur de l'aiguille :

$$fl \cos \alpha,$$

et la seconde :

$$m M l \sin \alpha.$$

Par suite :

$$f \cos \alpha = m M \sin \alpha,$$

ou en remplaçant f par sa valeur et isolant i :

$$i = \frac{MR}{2\pi n} \operatorname{tg} \alpha,$$

expression dans laquelle M est connu, et $\frac{R}{2\pi n}$ est une constante propre à l'appareil.

Cette boussole est celle des tangentes, en raison de la quantité variable $\operatorname{tg} \alpha$, fonction de l'intensité à mesurer. La longueur de l'aiguille doit être très petite.

La boussole des sinus n'en diffère que par l'adjonction du cercle gradué horizontal et la manière de s'en servir.

Quand le circuit, placé tout d'abord dans le méridien magnétique, a fait dévier l'aiguille, on fait tourner le cadre vertical jusqu'à ce que l'aiguille demeure dans son plan. Cela n'est pas d'ailleurs toujours possible.

Choisissons la même notation que précédemment;

les deux forces qui agissent actuellement sur l'aiguille et s'équilibrent sur l'un et l'autre pôle sont maintenant :

$$fl \quad \text{et} \quad m M l \sin \alpha$$

et l'on a :

$$f = m M \sin \alpha$$

c'est-à-dire :

$$\frac{2n\pi i}{R} = M \sin \alpha$$

d'où :

$$i = \frac{MR}{2\pi n} \sin \alpha.$$

La constante est la même que précédemment, mais l'intensité n'est connue qu'en fonction du sinus de l'angle de déplacement.

Il est utile de remarquer que la boussole des tangentes est moins précise que celle des sinus, surtout pour les déviations un peu fortes, car à une même erreur faite dans la lecture de l'arc α correspond, dans le calcul, une erreur absolue plus grande avec la première boussole qu'avec la seconde. Malheureusement celle-ci ne peut pas toujours être employée.

Quelle que soit la sensibilité de ces galvanomètres, ils ne sont plus que d'une très faible utilité ou sont même totalement insuffisants dès que l'intensité à mesurer est très petite. On emploie alors les galvanomètres astatiques. Ils se composent tous non plus d'une seule mais de deux aiguilles AB et $A'B'$ aimantées et solidaires dont les pôles contraires, de puissances à très peu près égales, sont placés en regard les uns des autres. L'une des aiguilles AB est à l'in-

térieur du cadre multiplicateur de Schweigger et l'autre A'B' à l'extérieur (fig. 29).

D'après la règle d'Ampère, on voit que le système se comportera, sous l'influence du courant, comme s'il n'y avait plus qu'une seule aiguille dont la puis-

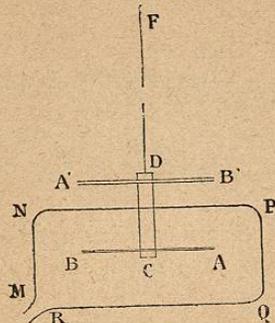


Fig. 29. — Principe du multiplicateur de Schweigger.

sance des pôles serait extrêmement petite et égale à la différence — aussi faible qu'on le veut — des puissances réelles des pôles magnétiques des deux aiguilles. Dans ces conditions, on comprend que le plus faible courant agisse pour le faire dévier du méridien.

Le galvanomètre de Nobili (fig. 30), basé sur ce principe, convient assez bien aux études électrophysiologiques; il devra cependant se graduer en milliampères et non pas seulement en degrés.

Le système astatique ABC est placé dans une cage de verre qui le met à l'abri des poussières et des perturbations de l'atmosphère. Il y est librement suspendu par un fil de cocon FD, et un cadran gradué

recouvre le multiplicateur. C'est l'aiguille supérieure qui indique les déplacements. Le tout est monté sur un trépied à vis calantes.

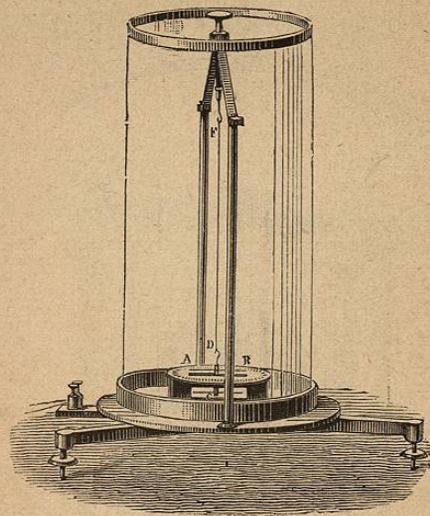


Fig. 30. — Galvanomètre de Nobili.

Quelques galvanomètres astatiques sont construits sur le modèle du télégraphe sous-marin de sir William Thomson.

M. Carpentier en a construit plusieurs de ce genre d'une rigoureuse précision.

Dans le galvanomètre Thomson, modèle Carpentier, le circuit est enroulé sur deux cadres plats d'ébonite, en forme de 8, qui sont rendus solidaires par le support central et deux écrous (fig. 31).

Un barreau aimanté très léger portant miroir est

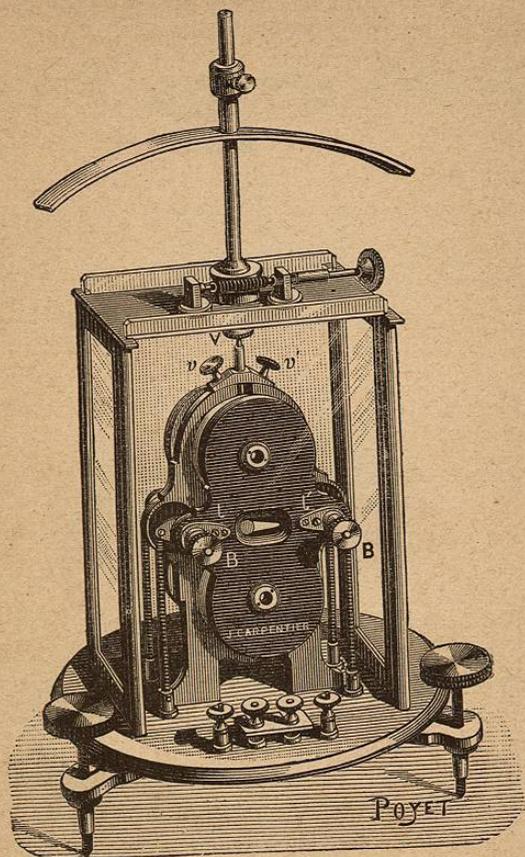


Fig. 31. — Galvanomètre de Thomson, modèle Carpentier.

compris entre ces cadres dont l'un, percé en son

milieu d'une petite fenêtre, permet aux rayons d'une source lumineuse d'éclairer ce miroir et d'accuser ainsi la plus faible déviation de l'équipage.

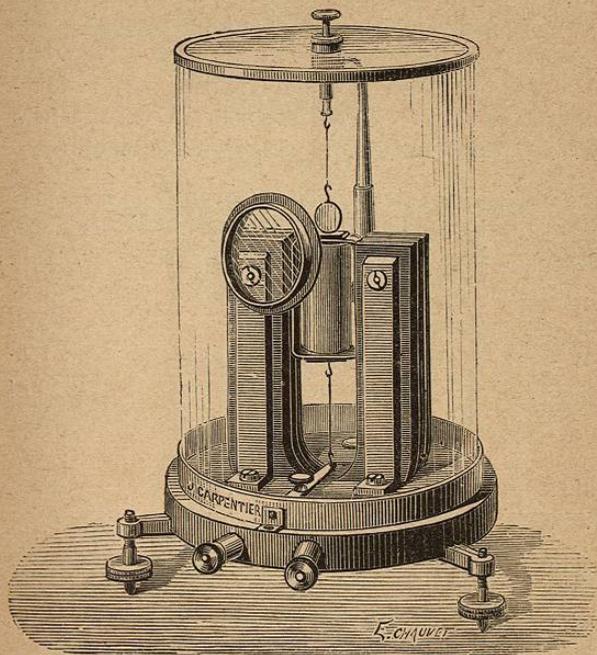


Fig. 32. — Galvanomètre aperiodique de MM. Marcel Deprez et d'Arsonval.

L'apériodicité est assurée par un losange en papier qui, par sa résistance sur l'air, amortit toute oscillation inutile et empêche toute perte de temps.

C'est aussi très facilement qu'on peut échanger les

bobines contre de plus petites plus résistantes ou moins résistantes.

Le galvanomètre aperiodique Deprez et d'Arsonval, construit avec tant d'habileté par M. Carpentier, constitue également un des appareils les plus précis qu'on puisse employer dans les laboratoires (fig. 32).

Ce galvanomètre dont l'apériodicité est pratiquement parfaite est entièrement soustrait aux influences des variations du champ magnétique ambiant.

Dans les formules que nous avons données plus haut au sujet des boussoles des tangentes et des sinus, nous avons supposé connu le rapport $\frac{M R}{2 \pi n}$. A la rigueur on peut l'ignorer. On fait alors passer dans le galvanomètre un courant d'intensité connue I et on observe une déviation d'angle de A ; soit toujours i l'intensité à mesurer donnant la déviation α ; on peut écrire :

$$\frac{i}{I} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} A} \quad \text{ou bien} \quad \frac{i}{I} = \frac{\sin \alpha}{\sin A}$$

d'où

$$i = I \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} A} \quad \text{ou} \quad i = I \frac{\sin \alpha}{\sin A}$$

selon qu'on se sert de la boussole des tangentes, ou de celle des sinus.

Il ne faudrait pas non plus préjuger de la puissance d'un galvanomètre au nombre des spires du multiplicateur.

L'intensité i du courant est, d'après la loi de Ohm :

$$i = \frac{E}{R + nr}$$

R étant la résistance du circuit autre que celui du galvanomètre et r la résistance d'une seule des n spires, E la force électromotrice.

Mais nous avons vu que :

$$f = K n i$$

K est la constante de l'appareil.

Par conséquent

$$f = K \frac{n E}{R + nr}$$

Cela nous montre que f augmente bien avec le nombre n de spires, mais l'augmentation est quelquefois absolument négligeable. Si nr est très petit par rapport à R , c'est-à-dire si la résistance extérieure au galvanomètre est très grande, les indications sont sensiblement proportionnelles à n ; si, au contraire, R est négligeable devant nr , ou mieux, si la résistance extérieure est très faible, la force f sensiblement égale à $\frac{E}{r}$ est à peu près indépendante de n .

Donc, pour obtenir des déplacements maxima, il faut aux *grandes résistances extérieures, beaucoup de spires*; aux *faibles résistances, peu de spires*.

Il peut encore arriver que le galvanomètre qu'on a à sa disposition est trop faible pour supporter directement l'intensité du courant, ou bien que ce courant fasse dévier l'aiguille jusque dans le voisinage de 90° . Il suffit simplement dans ce cas de brancher le galvanomètre sur un conducteur résistant qui ne laisse passer qu'une partie voulue du courant. Cette dérivation porte le nom de *shunt*.

Soit ρ la résistance de ce shunt, I l'intensité du courant qui y circule, i l'intensité du courant dans le galvanomètre, on a :

$$\frac{I}{i} = \frac{\frac{1}{nr}}{\frac{1}{nr} + \frac{1}{\rho}} = \frac{\rho}{\rho + nr} = \frac{1}{1 + \frac{nr}{\rho}}$$

On donne généralement au shunt une résistance égale au $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$, de la résistance du galvanomètre et alors l'intensité i est égale au $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{1000}$ du courant principal.

Dans les mesures si délicates de l'électrophysiologie, on doit noter que l'introduction d'un galvanomètre dans le circuit affaiblit le courant qu'on veut mesurer puisque la résistance totale, et r la résistance propre au galvanomètre, les intensités i et i' correspondantes à l'admission ou au rejet du galvanomètre sont :

$$i = \frac{e}{R} \quad \text{et} \quad i' = \frac{e}{R + r}$$

L'instrument mesurera i' ; on en déduira i par le calcul de

$$i = i' \left(1 + \frac{r}{R} \right)$$

Un inconvénient commun à tous les galvanomètres si précis que nous venons de passer en revue, et qui ne sont propres qu'aux études physiologiques, est de

comporter comme organe essentiel et principal un équipage aimanté dont le magnétisme ne tarde pas, sous l'influence des courants, à varier d'une façon notable. Un réétalonnage fréquent est nécessaire si on tient à posséder toujours un excellent instrument de mesure.

M. Marcel Deprez est parvenu à combiner un gal-

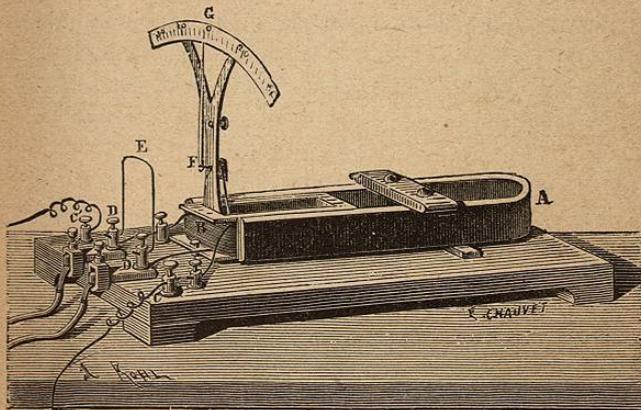


Fig. 33. — Galvanomètre de M. Marcel Deprez.

vanomètre très pratique, susceptible d'être employé en médecine et à éliminer l'aiguille indicatrice habituellement employée (fig. 33) :

Sur une planchette de bois est couché un fort électro-aimant A en fer à cheval entre les pôles duquel est fixé un cadre multiplicateur B fixe, à fil fin, pouvant agir sur une légère pièce de fer doux, mobile autour d'un axe horizontal.

Quand le courant ne passe pas, la pièce de fer doux, contenue dans le champ magnétique intense du gros aimant, s'oriente suivant la ligne des pôles; mais dès que le courant, amené à deux bornes vissées dans la planchette et au cadre, vient à circuler dans le fil fin, cette pièce est largement déviée et sa déviation est lue sur un cadran gradué G au moyen d'une longue aiguille F amplificatrice.

Comme la puissance du champ magnétique et le fil fin du cadre rendent l'amplitude maxima de l'angle de rotation toujours assez faible, les intensités mesurées sont sensiblement proportionnelles aux angles indiqués par le cadran.

Ce galvanomètre est, de plus, apériodique, c'est-à-dire que l'équipage n'oscille pas quand le courant cesse; il revient aussitôt à sa position d'équilibre.

Dans le même ordre d'idées, M. d'Arsonval a combiné récemment avec le concours de M. Gaiffe, un nouveau galvanomètre très sensible, à miroir et à cadran indicateur (fig. 34).

La bobine induite se meut à l'intérieur de deux aimants en segment de couronnes concentriques dont les solutions de continuité sont diamétralement orientées en sens inverses, et dont les pôles de noms contraires sont placés en regard les uns des autres. On a choisi cette disposition pour que la bobine influente coupe le plus grand nombre possible de lignes de force du champ magnétique et que les effets perturbateurs de l'extérieur soient le plus possible amortis.

Dans les modèles de laboratoire, à miroir, les dimensions relatives des parties du système sont

telles que la course de l'image pour la déviation maxima est de 50 centimètres à droite et à gauche du zéro, l'échelle de graduation étant située à 1 mètre de distance.

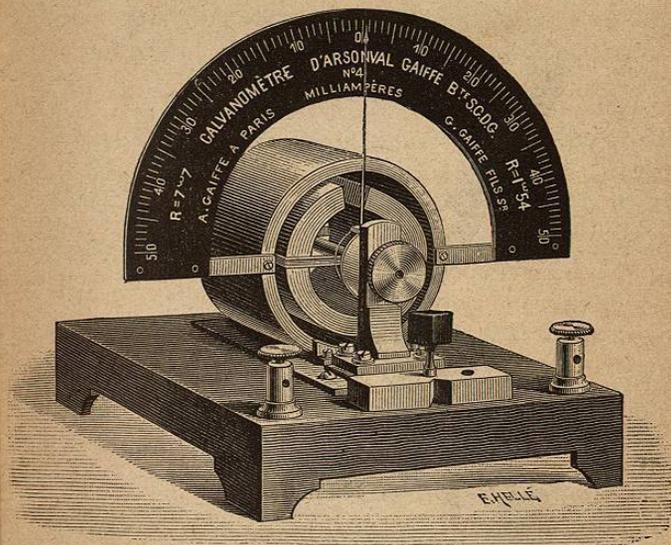


Fig. 34. — Galvanomètre de MM. Gaiffe et d'Arsonval.

Un autre galvanomètre très sensible, astatique et apériodique et dont la lecture des indications présente en surcroît l'avantage d'être permise à une distance assez grande, est le nouveau galvanomètre Trouvé (fig. 35), qui rappelle à première vue celui de Bourbouze. Mais, tandis que celui-ci ne pouvait servir que pour les courants d'une assez grande intensité et qu'il ne comportait par conséquent

qu'une faible précision, le galvanomètre de Trouvé est, au contraire, très précis et essentiellement propre

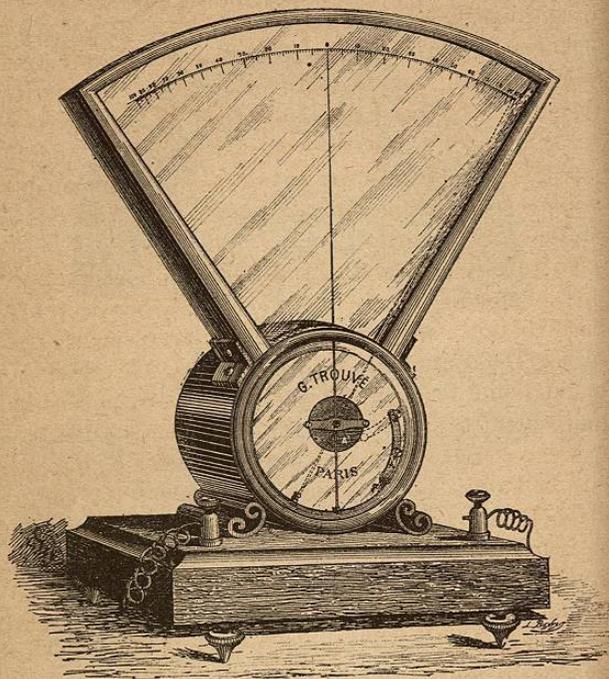


Fig. 35. — Galvanomètre Trouvé pour les cours ou les cliniques privées.

à la pratique médicale à laquelle il est spécialement destiné.

Tout l'appareil galvanométrique est hermétiquement renfermé dans un cylindre métallique qui est

surmonté d'un cadre à doubles glaces transparentes entre les faces desquelles peut librement osciller une longue aiguille indicatrice. La graduation *en milliampères* est gravée sur l'une de ces faces, et les lectures les plus délicates peuvent y être faites avec précision à plusieurs mètres de distance. L'apériodicité est obtenue par la résistance de l'air agissant sur une petite surface portée par l'aiguille dont la masse et le moment d'inertie sont extrêmement faibles : les moindres oscillations sont ainsi instantanément amorties.

Ce galvanomètre est très luxueux, d'un prix modique, et comme il est entièrement à l'abri de toute perturbation extérieure il offre toute sécurité. Ces trois grandes qualités, si rarement associées, le désignent d'une façon toute particulière aux médecins qui veulent l'exposer à air libre, comme à la Salpêtrière, sur une table d'électrothérapie. Là, il peut être laissé sans le moindre inconvénient aux coups d'air, à la poussière, etc., et subir, sans qu'on ait à craindre de le fausser, tous les déplacements et toutes les manipulations qui peuvent devenir nécessaires. Il se nettoie rapidement par un simple époussetage. C'est le seul galvanomètre de précision qui, à notre connaissance, jouit de tant d'avantages.

D'autres galvanomètres très pratiques sont les galvanomètres qui sont adjoints aux appareils médicaux les plus en usage. Tel est le galvanomètre Trouvé, qui peut être horizontal (fig. 36) ou vertical (fig. 37) ; il est gradué en milliampères d'un côté et de l'autre en degrés ; les angles de déviation ne sont pas,