misphère b reçoit une nouvelle quantité d'électricité positive, pendant que l'hémisphère a se charge d'électricité négative ; il y a donc, comme dans le cas précédent, attraction et répulsion. La seconde force l'emporte d'abord sur la première, parce que la quantité d'électricité positive sur le corps N est plus grande que la quantité d'électricité négative; mais, l'intervalle ac diminuant, la force attractive croît plus vite que la force répulsive et peut finir par l'emporter sur celle-ci.

3° *Le corps mobile est isolant et électrisé.* — Si le corps mobile est mauvais conducteur et électrisé, il est repoussé ou attiré, selon qu'il est chargé de la même électricité que le corps fixe ou d'une électricité contraire. S'il est d'abord à l'état naturel, son fluide neutre peut être décomposé à la longue par l'influence du corps M, si ce dernier est suffisamment électrisé, et alors il y a attraction.

938. **Théorie de l'influence électrostatique.** — Nous avons défini plus haut le potentiel V d'un conducteur. En général, le conducteur *n'est pas isolé :* il se trouve dans un champ électrique, par lequel il est influencé. Dans ce cas son potentiel dépend à la fois de sa charge propre et des masses électriques disséminées dans le champ : il faut donc tenir compte de ces masses dans l'évaluation du potentiel. Soient donc $\left(\frac{q}{r}+\frac{q_1}{r_1}+\ldots\right)$ la somme des termes relatifs à la charge propre du conducteur et $\left(\frac{q'}{r'}+\frac{q'_1}{r'_1}+\ldots\right)$ la somme des termes relatifs aux masses électriques du champ; on a dans le cas général

$$V=\Sigma\left(\frac{q}{r}\right)+\Sigma\left(\frac{q'}{r'}\right).$$

Supposons toutes ces masses électriques (q') réunies sur un conducteur unique B (fig. 873). Si B est chargé *positivement*, le potentiel en A sera plus grand que si A était isolé, et il sera d'autant plus grand que B est plus rapproché, car alors $\Sigma\frac{q'}{r'}$ est formé de termes positifs, d'autant plus grands que les distances r' sont plus petites. Si B est chargé *négativement*, le potentiel de A sera diminué par suite de la proximité de B, et d'autant plus que B est plus rapproché, car alors les termes $\frac{q'}{r'}$ sont tous négatifs et d'autant plus grands, en valeur absolue, que les distances r' sont plus petites.

Si B est *à l'état neutre*, il subit le *phénomène d'influence* (fig. 873) dès qu'il est suffisamment rapproché de A; son fluide neutre est décomposé, le fluide négatif attiré dans la région voisine de A et le fluide positif repoussé en quantité égale dans la région opposée. Il en résulte 1° que le potentiel, qui était d'abord nul en B, prend une certaine valeur positive; 2° que le potentiel est diminué en A, car le fluide négatif de B agit en A à une distance moindre que le fluide positif, et par suite la somme $\Sigma\left(\frac{q'}{r'}\right)$ est une somme algébrique où les termes positifs sont plus grands que les termes négatifs.

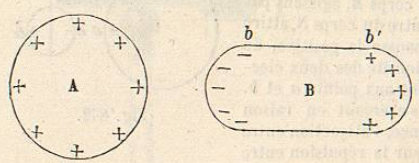

Fig. 873.

Si l'on mettait un point quelconque de B en communication avec la terre, son potentiel deviendrait égal à celui de la terre, c'est-à-dire *nul*, et le potentiel de A diminuerait un peu (à cause de la disparition des termes positifs qui dans la somme $\Sigma\frac{q'}{r'}$ correspondaient au fluide positif de l'extrémité b').

CHAPITRE VI

ÉLECTROSCOPES ET ÉLECTROMÈTRES.

939. **Définitions.** — On a vu (882) qu'on nomme *électroscopes* de petits appareils qui servent à reconnaître si un corps est électrisé et quelle est la nature de son électricité. Le pendule électrique, à une balle ou à deux balles, est le plus simple des électroscopes. On en a imaginé beaucoup d'autres ; nous ne décrirons, pour le moment, que l'électroscope à feuilles d'or. Quant aux *électromètres*, ce sont des appareils beaucoup plus sensibles, qui servent à *mesurer* les charges électriques des conducteurs, soit directement, et à l'état même de quantité d'électricité (balance de Coulomb), soit indirectement, et en fonction de leur *potentiel* (électromètre de Thomson).

940. **Électroscope à feuilles d'or, ou à pailles.** — Le plus simple et le plus classique des électroscopes est l'*électroscope à feuilles d'or*, ou *électroscope à pailles*.

Description de l'appareil. — Il consiste essentiellement en une tige de laiton verticale, terminée en haut par une boule C de même métal, et en bas par deux feuilles d'or battu n, n, très légères, ou par deux pailles très minces. Cette tige passe à frottement dans le bouchon d'une cloche de verre B (fig. 874), reposant sur un plateau de laiton ; cette cloche sert à la fois de support *isolant* et d'enveloppe protectrice pour l'instrument. Le goulot de la cloche, ainsi que sa partie supérieure, sont recouverts d'un vernis à la gomme laque pour compléter l'isolement de la tige métallique.

Opération et théorie. — Lorsqu'on approche lentement du bouton un corps chargé d'une électricité quelconque, négative par exemple, cette électricité décomposant par influence le fluide neutre du conducteur, l'électricité positive est attirée dans la boule, et l'électricité négative repoussée vers les feuilles d'or. Celles-ci, se trouvant ainsi chargées de la même électricité, se repoussent mutuellement, et leur divergence prouve que le corps A est électrisé.

Pour reconnaître la nature de son électricité, on commence par charger l'électroscope avec le corps lui-même. Pour cela, tandis que l'instrument est sous l'influence du corps A, on touche la boule C avec le doigt : l'électricité de même nom est alors repoussée dans le sol, et la boule reste chargée d'une électricité *contraire* à celle du corps (900). Les feuilles d'or retombent d'abord, toute l'électricité étant en C ; mais si l'on retire le doigt et ensuite le corps A, elles divergent de nouveau. Il reste à constater l'espèce d'électricité que conserve l'appareil. Pour cela, on approche lentement de la boule C un bâton de verre frotté avec de la laine. Si la divergence des feuilles d'or augmente, cela indique que l'électricité de l'électroscope est repoussée à la partie inférieure : d'où l'on conclut qu'elle est de même espèce que celle du verre, c'est-à-dire positive. Si la divergence diminue, c'est que l'électricité de l'appareil est attirée par celle du verre ; elle est donc de nom contraire, c'est-à-dire négative.

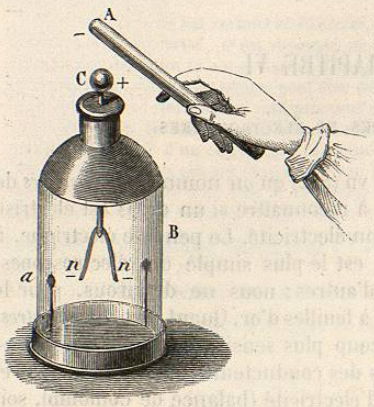

Fig. 874.

On arrive encore à reconnaître l'espèce d'électricité que possède un corps en chargeant d'abord l'électroscope d'une électricité connue. Si ensuite les feuilles d'or divergent quand on approche le corps, son électricité est de même nom que celle de l'électroscope.

Accessoires de l'instrument. — 1° Sur les parois intérieures de la cloche sont collées deux bandes d'étain *a* opposées l'une à l'autre et *communiquant avec le sol* par l'intermédiaire du plateau métallique. Elles ont pour effet d'augmenter la sensibilité de l'électroscope, en se chargeant par influence d'électricité contraire à celle des feuilles d'or.

2° Enfin, pour dessécher l'air sous la cloche, il est bon d'y placer une capsule contenant de la chaux vive ou toute autre matière avide d'eau.

941. **Électromètre de Henley.** — C'est une sorte de pendule électrique destiné à indiquer si une source d'électricité possède

toujours la même charge. Il se compose d'une tige de bois *d* à laquelle est fixé un cadran d'ivoire *c* (fig. 875). Au centre de ce dernier est un axe autour duquel tourne une aiguille de baleine, terminée par une boule de moelle de sureau *a*. L'instrument est ordinairement vissé sur l'un des conducteurs d'une *machine électrique* (948). A mesure que celle-ci se charge, l'aiguille diverge et elle monte jusqu'à ce que le maximum de charge soit atteint. Si l'on cesse alors de charger la machine, l'aiguille retombe rapidement dans l'air humide ; dans l'air sec elle ne retombe que lentement, ce qui indique que la déperdition est faible. Il n'y a pas d'ailleurs de relation simple entre l'inclinaison du pendule et la valeur de la charge. C'est pourquoi l'appareil est improprement appelé électromètre : ce n'est qu'un électroscope.

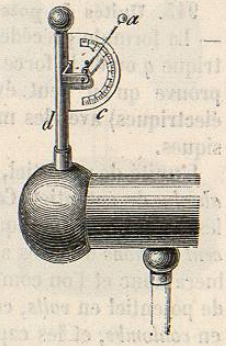

Fig. 875.

942. **Généralités sur les électromètres.** — Les potentiels des conducteurs électrisés en équilibre se mesurent à l'aide d'instruments qu'on appelle *électromètres*. Ce sont, comme nous les avons définis plus haut, des appareils qui permettent de *mesurer* les charges électriques des conducteurs, soit *directement*, soit *indirectement*, par l'intermédiaire de leurs potentiels.

Balance de Coulomb. — Le premier électromètre précis fut la balance de Coulomb. Nous avons vu comment on l'emploie pour obtenir le rapport des densités électriques en deux points d'un conducteur, par la méthode dite du *plan d'épreuve*. Si l'on veut mesurer avec cet appareil le potentiel d'un corps électrisé, on relie par un fil long et fin la balle fixe *m* de la balance (fig. 850) à un point quelconque du corps ; le potentiel de la balle fixe, mesuré par sa charge, est égal au potentiel du corps étudié. On sait, en effet, que si q est la charge commune donnée à la balle mobile *n* (celle qui est à l'extrémité de l'aiguille *pn*) et à la balle fixe, si f est la répulsion, mesurée par l'angle de torsion, et d la distance des centres, on a

$$f = \frac{q^2}{d^2},$$

d'où l'on déduit

$$q = d\sqrt{f}.$$

Enfin, si r est le rayon de la balle et V le potentiel inconnu,

on a

$$V = \frac{q}{r} = \frac{d}{r}\sqrt{f}.$$

943. **Unités de potentiel : unité absolue et unité pratique** (*volt*). — La formule précédente exprime V en fonction de la masse électrique q ou de la force électrique f et des longueurs d et r : cela prouve qu'on peut évaluer les potentiels (comme les masses électriques) avec les mêmes unités que les autres grandeurs physiques.

L'unité de potentiel, rapportée aux unités C.G.S., s'appelle *unité absolue* de potentiel. Cette unité étant beaucoup trop petite pour les applications pratiques, on a choisi une *unité secondaire* qui vaut *cent millions* d'unités absolues et qu'on a appelée le *volt*[1]. On évaluera donc et l'on comptera soit les potentiels, soit les différences de potentiel en *volts*, comme on évalue les quantités d'électricité en *coulombs*, et les capacités électriques en *farads*.

944. **Perfectionnements de la balance de Coulomb.** — Ils ont eu pour objet d'accroître sa sensibilité comme *électromètre*.

1° On y parvient déjà en employant la méthode dite *hétérostatique*, qui consiste à communiquer préalablement à la boule mobile une charge auxiliaire permanente q'. La formule devient alors

$$V = \frac{d}{r}\sqrt{\frac{f}{q'}}.$$

2° Il y a avantage à remplacer le contrepoids de la balle mobile par une seconde balle qu'on place à la même distance du centre de la première ; on fait agir sur ces deux balles, qui sont fixées aux extrémités du levier que soutient le fil de torsion, quatre balles fixes disposées aux sommets d'un rectangle dont les diagonales se coupent sur le prolongement du fil de torsion : les centres des balles fixes et les centres des balles mobiles se trouvent dans un même plan horizontal. On donne à l'un des systèmes, par exemple aux balles mobiles, une charge permanente et invariable et les déviations du levier mobile sont mesurées par la méthode du miroir.

3° *Balance ou électromètre de Dellmann.* — Dellmann eut l'idée de modifier la balance de Coulomb en remplaçant les deux sphères par deux bandes métalliques horizontales, dont l'une était fixe, tandis que l'autre, soutenue par un fil de torsion, était suspendue à une petite distance de la bande fixe.

4° *Balance ou électromètre de Thomson.* — Sir W. Thomson accrut encore notablement la sensibilité en adoptant un dispositif analogue à celui des quatre balles fixes. Toutefois il remplaça la boule mobile par une aiguille plate C en aluminium, découpée en forme de 8, et les boules fixes par les quatre segments égaux A et A', B et B', reliés deux à deux, d'une sorte de boîte cylindrique plate. C'est dans l'intérieur de ces segments ou *quadrants* que se meut

1. On lui a donné ce nom pour rappeler la mémoire de l'illustre physicien Volta.

l'aiguille d'aluminium (fig. 876). L'électromètre de Thomson est connu sous le nom d'*électromètre à quadrants*.

Plusieurs électromètres ont été construits sur le même plan que l'électromètre de Thomson, entre autres l'électromètre Branly. Nous décrirons ce dernier, comme type des électromètres à quadrants simplifiés.

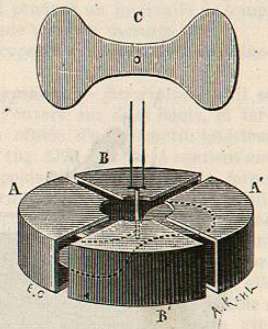

Fig. 876.

945. **Électromètre de M. Branly.** — *Description.* — L'aiguille est une large plaque en aluminium, en forme de 8 ; elle se meut horizontalement au-dessus de quatre secteurs plats en laiton, isolés les uns des autres et formant les quadrants d'un même *cercle ;* ces secteurs plans jouent le même rôle que les quadrants creux de Thomson et, comme ceux-ci, ils sont reliés deux à deux en diagonale. Le centre de l'aiguille et celui du cercle sont sur une même verticale. La plaque mobile est soutenue par un fil métallique ; cet axe de suspension se prolonge au-dessous de la plaque par une tige verticale à laquelle est fixé un miroir.

L'appareil est renfermé dans une cage carrée (fig 877) en glaces, surmontée d'un tube de verre sur lequel s'adapte une pince qui tient le fil de torsion. Un mouvement lent de cette pince permet d'abaisser ou d'élever légèrement la plaque mobile et, comme dans la balance de Coulomb, la pince peut être entraînée par le mouvement d'un tambour.

Usage. — Une charge auxiliaire permanente peut être communiquée soit au secteur, soit à la plaque mobile : nous supposerons, par exemple, que la plaque soit chargée préalablement. Soit à mesurer avec l'électromètre les différences de potentiel que présentent les deux pôles d'une pile ou deux points quelconques D et D' d'un conducteur traversé par un courant.

On donne à la plaque mobile sa charge constante, en la reliant par le fil métallique de suspension et par la pince au pôle positif A d'une pile dont le pôle négatif communique en T avec le sol[1]. On relie ensuite le point D par un long fil au système des secteurs 1 et 3 qui prennent le potentiel de D et l'on relie de même l'autre point au système des secteurs 2 et 4 qui prennent le même potentiel que D' (fig. 878). La plaque mobile, chargée positivement, est alors attirée par l'un des couples de secteurs et repoussée par l'autre. Pour un certain angle d'écart, il y a équilibre entre la force de torsion du fil et l'action exercée sur la plaque par les secteurs fixes.

Théorie. — Les indications de cet instrument sont proportionnelles à celles de la balance de Coulomb : la déviation de la plaque mobile, quand on a soin de n'admettre que de très petits angles d'écart (égaux au plus à 3 degrés), *est proportionnelle au produit du potentiel de cette plaque par la différence des potentiels des deux systèmes de secteurs.*

1. M. Branly emploie comme pile de charge une pile à eau pure, formée ordinairement de 100 éléments zinc-cuivre, de très petite dimension, associés en série et fixés sur un support isolant de résine ou de caoutchouc durci. (Nous verrons plus loin que les piles électriques sont les appareils les plus commodes pour communiquer à un conducteur des charges électriques de potentiel constant, et qu'on appelle *force électromotrice* d'une pile la différence de potentiels qui s'établit spontanément, par le jeu de l'appareil, entre ses deux *extrémités* ou *pôles*.)

Remarques. — 1° Avant de procéder aux expériences, il est indispensable de

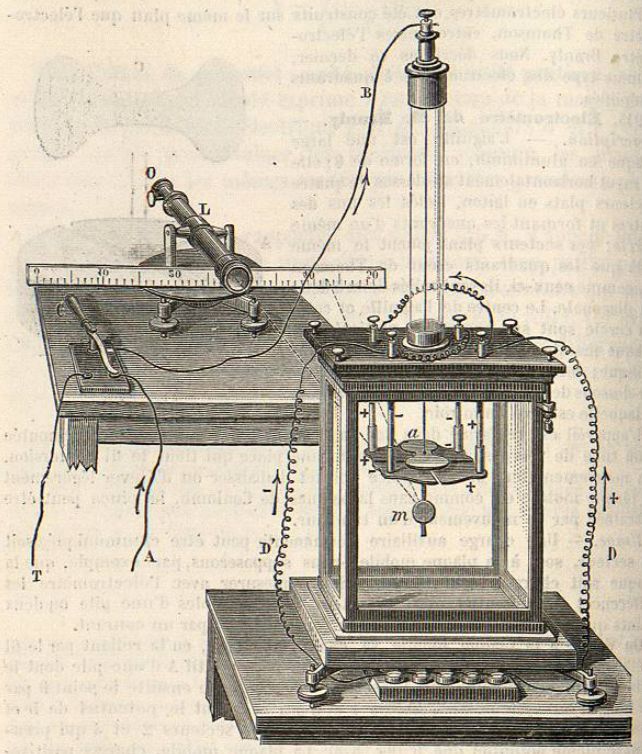

Fig. 877.

régler d'une façon précise la position d'équilibre de la plaque mobile. Pour cela, on tourne légèrement cette plaque à l'aide du tambour qui supporte la pince et le fil métallique, jusqu'à ce qu'elle ait pris une position qui ne varie pas quand on fait communiquer les quatre secteurs avec le sol.

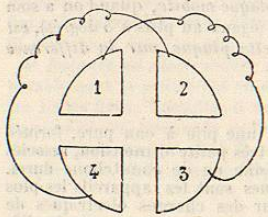

Fig. 878.

2° Dans certaines mesures, par exemple lorsqu'il s'agit de déterminer la capacité d'un conducteur, il est préférable de donner aux secteurs une charge fixe. Les secteurs 1 et 3 sont alors mis en communication avec le pôle positif d'une pile à eau, les secteurs 2 et 4 avec le pôle négatif; le milieu de cette pile est relié au sol. C'est alors le conducteur à étudier que l'on fait communiquer avec la plaque mobile.

3° On modifie à volonté la sensibilité de cet électromètre, en élevant ou en abaissant l'aiguille à l'aide de la pince qui soutient le fil et en variant le nombre des éléments de charge. D'après M. Branly, on peut apprécier aisément et avec sûreté des différences de potentiel *inférieures à* $\frac{1}{100}$ *de Daniell.*

4° Cet instrument, employé surtout à effectuer des mesures comparatives, conserve rigoureusement la même sensibilité pendant un intervalle de temps assez long pour qu'on ait le temps d'opérer une série de mesures.

5° On peut aussi l'employer comme électroscope dans les *méthodes de réduction à zéro.*

946. **Électromètre capillaire de M. Lippmann.** — *Description.* — Il se compose essentiellement d'un tube vertical A, ouvert aux deux bouts, et terminé à sa partie inférieure par une portion effilée d'un diamètre intérieur très petit, qu'on appelle la *pointe capillaire* (fig. 879). Le tube A contient une colonne de mercure qui pénètre par son poids dans la pointe et forme une colonne cylindrique très capillaire, terminée par un ménisque hémisphérique M. Cette pointe plonge dans de l'acide sulfurique étendu, contenu dans une éprouvette cylindrique B. Au fond de l'éprouvette B se trouve une couche de mercure; l'eau acidulée est d'une part en contact avec le mercure, et remplit, d'autre part, la partie inférieure de la pointe capillaire; elle en mouille les parois, et elle baigne le ménisque M. Deux fils de platine α et β servent à mettre les masses de mercure A et B en communication avec deux bornes électriques isolées b et b', qui constituent les deux *pôles* de l'électromètre (fig. 880).

Principe. — Les électromètres décrits plus haut sont fondés sur les actions à distance que régit la loi de Coulomb. L'électromètre capillaire repose sur un phénomène de contact. On observe que si l'on met les pôles α et β en communication métallique l'un avec l'autre, le ménisque M s'arrête en une position d'équilibre qui est le zéro de l'appareil. Vient-on maintenant à intercaler entre α et β une différence de potentiel e, on observe que le ménisque se déplace immédiatement et prend une nouvelle position d'équilibre : or *le déplacement du ménisque dépend de la différence du potentiel employée et il peut, par suite, lui servir de mesure.*

Opération. — Au lieu de mesurer cette grandeur par le déplacement même du ménisque, on peut opérer d'une manière différente. L'appareil est muni d'une poire en caoutchouc P engagée entre les mâchoires d'un étau à vis V (fig. 880). En faisant tourner cette vis, on comprime graduellement l'air contenu dans la poire. Cette pression d'air, qu'on appelle la *pression compensatrice*, se communique par l'intermédiaire du tube *tt* au mercure contenu dans le tube A et ramène le ménisque jusqu'à son zéro primitif; à ce moment on lit la valeur de la pression compensatrice sur un manomètre N qui communique avec la poire de caoutchouc. Lorsqu'on opère de cette façon, on mesure la force électromotrice au moyen, non plus des déplacements, mais des pressions qu'il a fallu employer pour les annuler.

Quant aux mouvements du ménisque, ils s'observent non à l'œil nu, mais à travers un microscope horizontal L braqué à poste fixe sur la pointe capillaire. La figure 880 représente en perspective l'électromètre avec ses accessoires, montés sur le support en bois SS.

Graduation. — La déviation produite, ou bien la pression compensatrice employée, ne dépend que des différences de potentiel établies entre les pôles α et β. L'appareil se gradue *empiriquement*, c'est-à-dire qu'on détermine expérimentalement, en se servant d'une série de différences de potentiel ou de forces électromotrices connues, les valeurs correspondantes de la pression compensatrice. M. Lippmann a d'ailleurs montré que tous les électromètres capillaires sont comparables entre eux, de sorte que *la table de graduation qu'il a construite pour l'un d'eux peut servir aux autres.*

Sensibilité de l'instrument. — L'électromètre capillaire mesure jusqu'au $\frac{1}{10000}$ environ la force électromotrice d'un élément Daniell. De plus, ses indi-

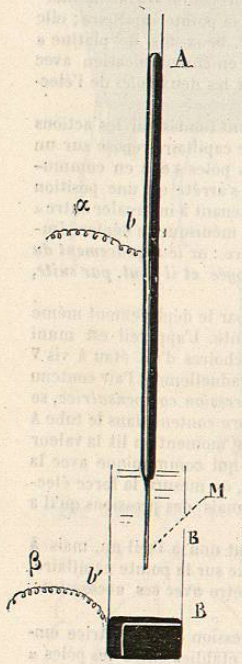

Fig. 879.

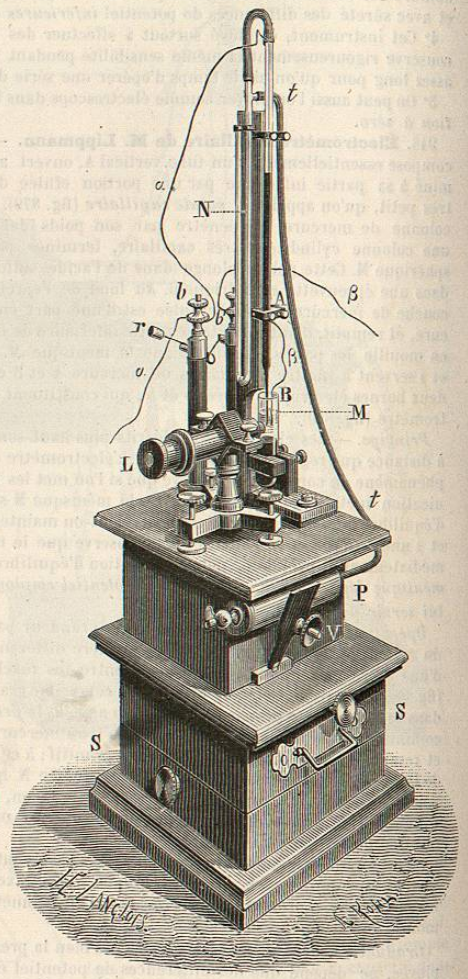

Fig. 880.

cations sont instantanées : la colonne de mercure prend immédiatement et sans oscillations la position d'équilibre qui lui convient [1]. Par contre, il

1. La colonne de mercure obéit si rapidement aux changements de la force

ne peut servir directement à mesurer des forces électromotrices supérieures à un Daniell ; et il faut ne l'employer que dans un cas déterminé, c'est-à-dire mettre le pôle β en communication avec le pôle négatif de l'élément à mesurer.

Bien que la masse du mercure A soit en contact avec de l'acide sulfurique étendu, elle se comporte comme si elle en était électriquement isolée. Ainsi, quand, après avoir mis les pôles α et β en communication avec les pôles d'une pile, on supprime les communications, le potentiel atteint par A ne varie pas, non plus que le déplacement du mercure. Pour la même raison, l'électromètre capillaire est sensible à l'approche d'un bâton de résine frotté, et la colonne de mercure suit à distance tous les mouvements du corps électrisé.

Théorie. — Pour expliquer le fonctionnement de l'électromètre capillaire, il faut considérer les actions qui ont pour siège le ménisque M, où le mercure est en contact avec l'eau acidulée. Lorsqu'on intercale entre α et β une force électromotrice, telle que celle d'un élément Daniell, le ménisque M se polarise, c'est-à-dire qu'il y naît une force électromotrice capable de faire équilibre à celle de l'élément et d'empêcher le passage du courant [1]. (Il faut seulement que la force électromotrice ne dépasse pas beaucoup un Daniell, autrement elle n'est plus équilibrée : le courant passe et l'eau acidulée est décomposée.) La force électromotrice antagoniste ainsi développée est précisément égale à la force électromotrice e, à laquelle elle fait équilibre ; on l'appelle *force électromotrice de polarisation*. D'autre part, le ménisque M est le siège de forces capillaires, qui ont pour effet de soutenir la colonne A, laquelle, par suite de son poids, tend à sortir par la pointe capillaire. On démontre que la résultante de ces forces équivaut à une pression h, provenant de la *tension superficielle* (512), et qui aurait pour valeur

$$[1] \qquad h = \frac{2A}{\rho},$$

ρ étant le rayon du ménisque hémisphérique M, et A étant la *constante capillaire*, laquelle dépend de l'état de la surface mercurielle. Lorsque celle-ci se polarise, A varie, et, ainsi que l'a démontré M. Lippmann, A est une fonction continue de e. Il s'ensuit, d'après la formule [1], que h est également fonction de e. Lorsqu'on ramène le ménisque à occuper toujours la même position dans la pointe, on ramène le rayon ρ du ménisque à avoir toujours la même valeur ; il s'ensuit, d'après la formule [1], que la valeur de h doit varier comme celle de A, c'est-à-dire que *la pression à exercer sur le mercure est fonction de la force électromotrice e*. C'est pour cette raison que les pressions compensatrices produites au moyen de la vis V correspondent, comme on l'a dit plus haut, aux forces électromotrices qu'on intercale entre α et β, et que l'on se propose de mesurer.

électromotrice, que, si l'on intercale l'électromètre dans un circuit téléphonique, la colonne vibre comme le ferait la plaque d'un téléphone ; et, comme ces vibrations se communiquent par réaction au support de l'appareil, si l'on applique l'oreille contre ce support, on entend alors les sons musicaux ou la parole articulée comme dans un récepteur téléphonique.

1. Nous étudierons plus loin ce phénomène, appelé *polarisation des électrodes*.