

Titre général : L'Électricité à l'exposition de 1902

Auteur : Hospitalier, E.

Titre du volume : L'Électricité à l'Exposition de 1900. 13. Instruments de mesure électrique

Mots-clés : Exposition internationale (1900 ; Paris) ; Électricité

Description : 1 vol. (160 p.) ; 32 cm

Adresse : Paris : Vve Ch. Dunod, 1901

Cote de l'exemplaire : 4 XAE 68.13

URL permanente : <http://cnum.cnam.fr/redir?4XAE68.13>

L'Électricité à l'Exposition de 1900

Publiée avec le concours et sous la direction technique de MM.

E. HOSPITALIER

Rédacteur en chef de *l'Industrie électrique*

J.-A. MONTPELLIER

Rédacteur en chef de *l'Électricien*

AVEC LA COLLABORATION

D'INGÉNIEURS ET D'INDUSTRIELS ÉLECTRICIENS

TOME II (FASCICULES 7 A 11)

Applications mécaniques et thermiques de l'Énergie électrique

PARIS

V^{VE} CH. DUNOD, ÉDITEUR

49, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 49

TÉLÉPHONE 147.92

—
1902

L'Électricité à l'Exposition de 1900

Publiée avec le concours et sous la direction technique de MM.

E. HOSPITALIER

Rédacteur en chef de *l'Industrie électrique*

J.-A. MONTPELLIER

Rédacteur en chef de *l'Électricien*

AVEC LA COLLABORATION
D'INGÉNIEURS ET D'INDUSTRIELS ÉLECTRICIENS

13^e FASCICULE

INSTRUMENTS DE MESURE ÉLECTRIQUE

PAR

J.-A. MONTPELLIER et M. ALIAMET

PARIS

V^{ME} CH. DUNOD, ÉDITEUR

49, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 49

TÉLÉPHONE 147-92

1901

L'ÉLECTRICITÉ

A

L'EXPOSITION DE 1900

TREIZIÈME PARTIE

INSTRUMENTS DE MESURE ÉLECTRIQUE

I

GALVANOMÈTRES

GALVANOMÈTRES A AIMANT MOBILE ET A BOBINE FIXE

Galvanomètres lord Kelvin. — Les galvanomètres lord Kelvin, connus également sous le nom de galvanomètres Thomson, sont des galvanomètres astatiques. Plusieurs modèles de ce galvanomètre ont été exposés par divers constructeurs.

Modèles Ducretet. — M. E. Ducretet, de Paris, construit des galvanomètres lord Kelvin à une paire de bobines (fig. 4). L'équipage mobile comporte deux petits aimants astatiques B et AB' et un petit miroir M, reliés entre eux d'une manière rigide par un fil d'aluminium; le tout est suspendu, comme le montre la figure 4, à un fil de cocon sans torsion. L'un des aimants B se trouve au centre du cadre galvanométrique circulaire BO renfermé dans une cage en laiton que supporte un trépied muni de vis élastiques. L'aimant AB' est placé à l'intérieur d'une petite cavité, et sert en même temps d'amortisseur à air. Un aimant directeur recourbé BB', supporté par une tige verticale, est placé au-dessus de la cage cylindrique; cet aimant sert à faire varier la sensibilité de l'instrument en modifiant la hauteur à laquelle on le fixe; à cet effet, l'aimant porte en

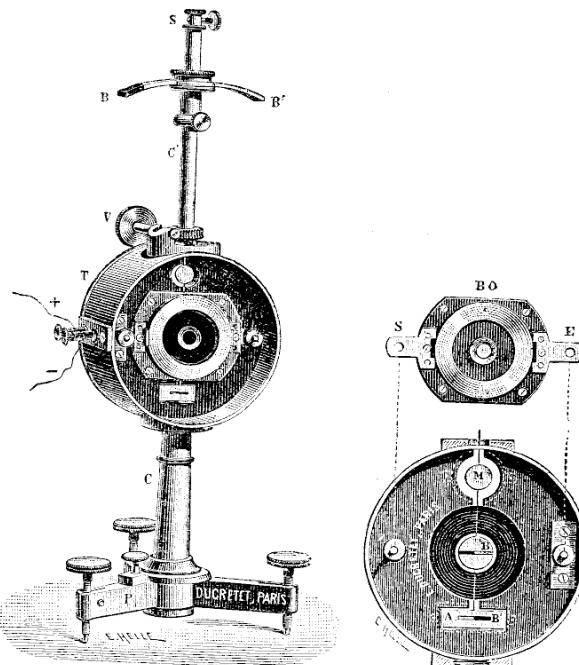


FIG. 4. — Galvanomètre lord Kelvin à une seule paire de bobines, modèle E. Ducretet.

son centre un manchon en laiton qui peut glisser à frottement doux sur la tige verticale lui servant de support et une vis de pression permet de l'immobiliser. Une vis tangente V sert

à faire tourner lentement sur elle-même, dans un sens ou dans l'autre, la tige verticale et, avec elle, l'aimant directeur.

Dans le modèle de galvanomètre lord Kelvin à deux paires de bobines, construit par M. E. Ducretet (fig. 2), l'équipage mobile est constitué par deux séries de petits aimants B, B', reliées entre elles d'une manière rigide par un fil d'aluminium et constituant un système astatique. Ce fil porte, en son centre, un petit miroir circulaire M et, à son extrémité inférieure, une petite lame placée dans une petite chambre constituant l'amortisseur à air. Cet équipage mobile est suspendu par un simple fil de cocon que l'on attache au crochet que porte une vis S, fixée à l'extrémité de la tige creuse C servant de support à l'aimant directeur BB'. Le cadre galvanométrique comporte deux bobines circulaires Bo et Bo', une inférieure et une supérieure, chacune d'elles étant divisée en deux moitiés, indépendantes et amovibles, séparées par une carcasse verticale. Une des extrémités de l'enroulement de chaque demi-bobine est reliée à l'une des quatre bornes fixées sur le socle, les extrémités opposées étant reliées entre elles.

Dans ces galvanomètres de grande sensibilité,

la résistance du cadre galvanométrique est d'environ 5 000 ohms; il se construit également des modèles où cette résistance atteint 8 000 ohms.

La facilité avec laquelle on peut enlever les bobines permet d'en avoir une série de rechange. On peut ainsi effectuer avec un seul instrument les mesures les plus diverses, suivant que l'on utilise des bobines de résistances faible ou élevée, et grâce aussi à la faculté que donnent les quatre bornes de n'utiliser qu'une seule paire de bobines ou les deux, couplées en série ou en parallèle.

MODÈLES J. CARPENTIER. — Le galvanomètre lord Kelvin, modèle J. Carpentier (fig. 3), a un équipage mobile constitué par deux séries de petits aimants de 1 cm de longueur (fig. 4), reliés entre eux d'une manière rigide par un fil d'aluminium et constituant un système astatique. Ce fil d'aluminium porte en son milieu un petit miroir circulaire, d'environ 1 cm de diamètre, ainsi qu'une petite ailette en aluminium ou en mica servant d'amortisseur. Cet équipage mobile est suspendu par un simple fil de cocon sans torsion que l'on attache au crochet que porte un bouton V (fig. 3) glissant à frottement dans une douille en laiton fixée à la partie supérieure de la carcasse de l'instrument par deux petites vis v, v'. Ce bouton V peut être élevé ou abaissé à volonté; lorsqu'on l'abaisse à fond, le fil de cocon n'est plus tendu et on peut déplacer l'instrument sans s'exposer à rompre ce fil de suspension.

Une ouverture est ménagée au centre de l'instrument, dans l'intervalle séparant la bobine inférieure de la bobine supérieure, afin de donner passage aux rayons lumineux qui doivent frapper le miroir.

Le cadre galvanométrique est fixé sur une carcasse en laiton reposant sur un socle en ébonite muni de trois vis calantes et d'un niveau à bulle d'air. Ce cadre se compose de deux bobines circulaires, une inférieure et une supérieure, chacune d'elles étant divisée en deux moitiés indépendantes séparées par la carcasse verticale en laiton. La demi-bobine supérieure

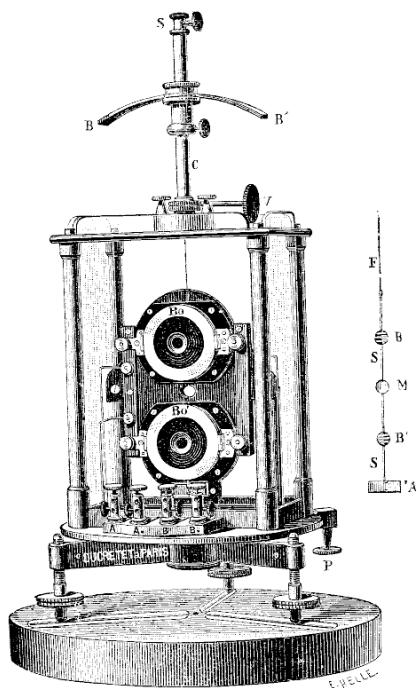


Fig. 2. — Galvanomètre lord Kelvin à deux paires de bobines, modèle E. Ducretet.

et la demi-bobine inférieure d'un même côté de la carcasse sont montées sur une platine unique en ébonite. Les deux platines, antérieure et postérieure, garnies chacune de la demi-

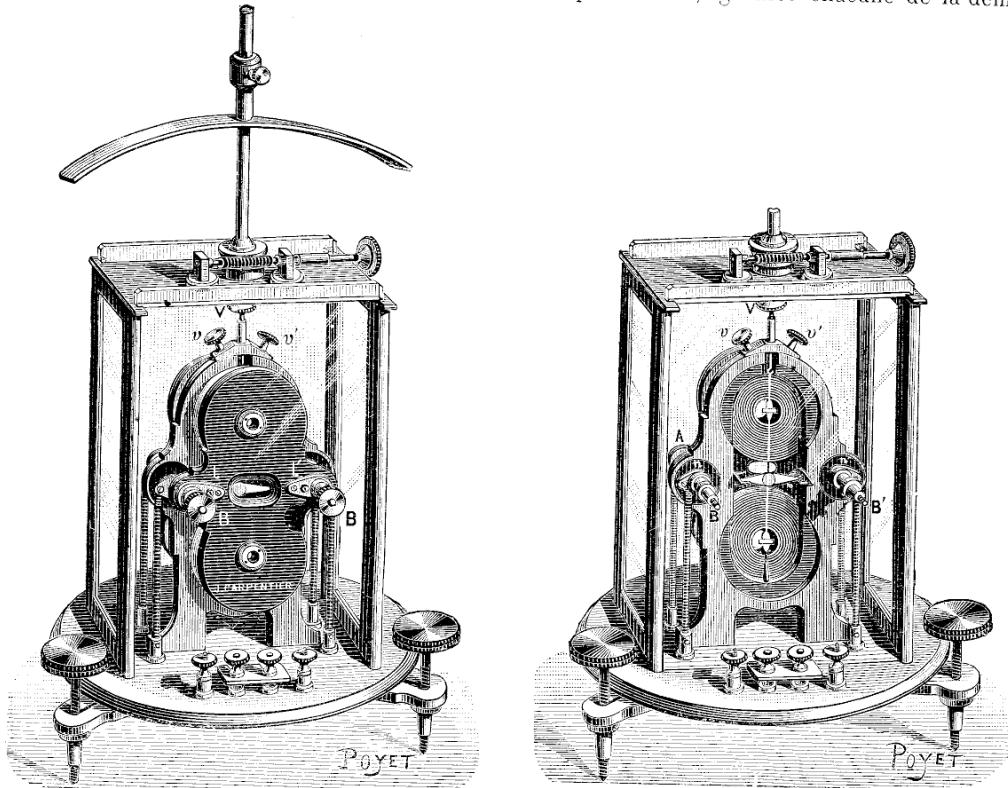


Fig. 3. — Galvanomètre lord Kelvin, modèle J. Carpentier.

bobine inférieure et de la demi-bobine supérieure, se fixent respectivement sur une des faces de la carcasse en laiton verticale à l'aide de deux boutons B, B', qui se vissent sur des tiges filetées adaptées à la carcasse. Cette disposition permet de démonter très facilement l'instrument pour vérifier l'équipage mobile ou pour remplacer le fil de cocon qui le supporte; en outre, les bobines étant amovibles, on peut les remplacer par d'autres ayant une résistance différente. Une des extrémités de l'enroulement de chaque demi-bobine est reliée à l'une des quatre bornes fixées sur le socle; les extrémités opposées sont reliées entre elles par l'intermédiaire des tiges filetées sur lesquelles se fixent les boutons B, B'.

Dans les galvanomètres de grande sensibilité, les bobines sont enroulées avec du fil de cuivre de 0,1 mm de diamètre et chaque moitié de bobine, comportant environ 12 000 spires, a une résistance de 3 000 ohms. Dans d'autres galvanomètres moins sensibles, l'enroulement est fait en fil de cuivre de 1 mm; la résistance de chaque demi-bobine n'est plus alors que de 3 ohms.

Avec une série de bobines de recharge, le même galvanomètre peut être utilisé pour effectuer les mesures les plus diverses en employant des bobines de résistance appropriée.

Un aimant directeur, placé au-dessus de la cage en verre qui protège le galvanomètre, sert à faire varier la sensibilité de l'instrument et aussi à ramener l'équipage mobile au zéro de l'échelle.

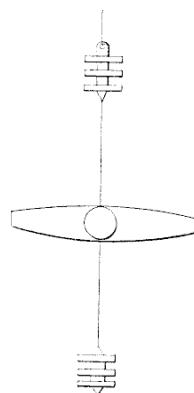


Fig. 4. — Équipage mobile du galvanomètre lord Kelvin, modèle J. Carpentier.

M. J. Carpentier construit également des galvanomètres lord Kelvin n'ayant qu'une seule paire de bobines. Leur construction est analogue à celle des galvanomètres à deux paires de bobines.

MODÈLE KEYSER ET SCHMIDT. — MM. Keyser et Schmidt, de Berlin, ont exposé un modèle de galvanomètre lord Kelvin, construit d'après les indications du professeur Szymanski qui a eu surtout en vue d'établir un modèle dont le prix de construction soit peu élevé.

Dans cet instrument (*fig. 3*), les quatre bobines sont constituées par du fil de cuivre agglutiné et sont simplement garnies de papier, puis collées à la gomme laque sur des plaques d'ébonite qui leur servent de support. Les bobines d'avant sont montées sur une planchette, représentée à droite de la figure, et peuvent s'enlever facilement pour permettre de vérifier l'équipage mobile, qui ne présente rien de particulier. Pour que cette planchette soit toujours dans la même position, elle est munie de deux tiges horizontales que l'on glisse dans des tubes fixés à la planchette d'arrière; un simple crochet suffit pour l'immobiliser.

Un aimant directeur est placé sous le socle et se manœuvre à l'aide d'une vis qui traverse ce socle; l'aimant directeur supérieur est commandé par un bouton mo-

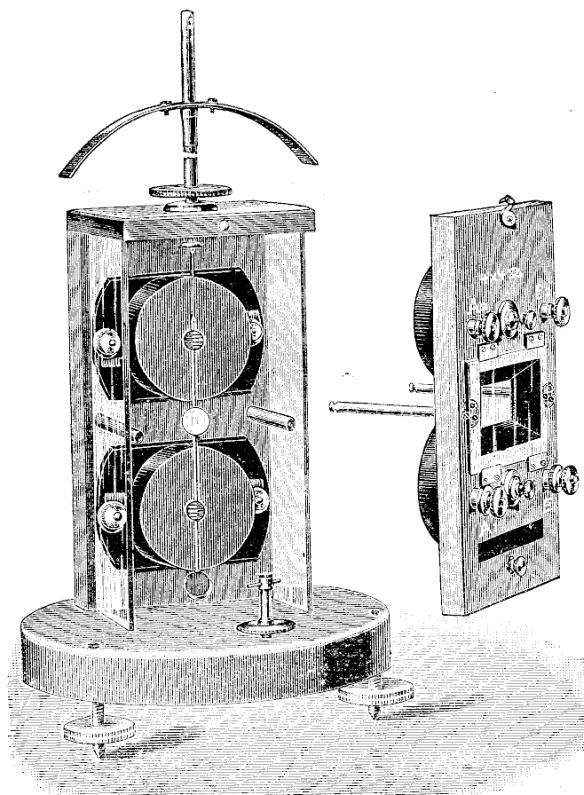


FIG. 3. — Galvanomètre lord Kelvin, modèle Keyser et Schmidt.

letté, la vis tangente utilisée d'ordinaire ayant été abandonnée comme étant de construction trop coûteuse.

Ce galvanomètre est destiné particulièrement aux élèves qui effectuent des mesures à titre d'exercice pratique.

MODÈLE J. WHITE. — M. James White, de Glasgow, le constructeur des instruments de lord Kelvin, exposait un modèle de galvanomètre à deux paires de bobines, analogue à ceux qui viennent d'être décrits et dont il ne diffère que par la disposition donnée à l'équipage mobile (*fig. 6*); le miroir est collé sur le groupe d'aimants supérieur et l'amortisseur est placé sur le groupe d'aimants inférieur.



FIG. 6. — Équipage mobile du galvanomètre lord Kelvin, modèle James White.

s'quent; le point conséquent de l'une des aiguilles étant *nord* et celui de l'autre étant *sud*,

Galvanomètre astatique Broca. — Le galvanomètre Broca, construit et exposé par M. J. Carpentier, est un galvanomètre astatique de grande sensibilité. L'équipage mobile (*fig. 7*) est constitué par deux longues aiguilles verticales NSN, SNS, pouvant tourner autour d'un axe vertical formé par un fil de cocon. Ces aiguilles, qui doivent être rigoureusement parallèles, sont aimantées de façon à avoir en leur milieu un pôle con-

M. Broca a placé les aiguilles dans une position rigoureusement verticale avec les pôles de noms contraires en regard pour obtenir un système astatique.

Les bobines fixes de ce galvanomètre sont de petites dimensions et leur centre se trouve à la hauteur des pôles conséquents des aiguilles ; les extrémités de ces dernières dépassent les bobines, qui agissent ainsi sur le flux allant d'un pôle conséquent à l'autre. Dans ces conditions, le système est astatique par lui-même et les deux aiguilles peuvent avoir des aimantations sensiblement différentes, sans qu'il en résulte aucun inconvénient, l'équipage mobile étant ainsi à l'abri des champs magnétiques extérieurs.

L'aimant directeur ordinaire des galvanomètres lord Kelvin a été remplacé par deux petites aiguilles aimantées très fines et placées, l'une normalement aux bobines fixes, l'autre parallèlement et à la hauteur de l'un des pôles de l'équipage mobile. Ces aiguilles ne peuvent prendre que des mouvements de translation dans de petits tubes à frottement doux. L'aiguille normale sert à annuler, une fois pour toutes, les forces qui dévient l'équipage de sa position d'observation ; l'aiguille parallèle aux bobines est utilisée pour faire varier la valeur de la force directrice.

Le galvanomètre Broca convient tout particulièrement aux mesures délicates de recherches physiologiques et de thermo-électricité.

Galvanomètre astatique Hartmann et Braun. — Cet instrument (*fig. 8*) se compose d'un anneau en bronze vertical fixé sur un socle muni de trois vis calantes.

Cet anneau sert de support à deux groupes de chacun deux bobines fixes, dont les axes sont parallèles. Ces bobines peuvent être facilement retirées, soit pour les changer, soit pour vérifier l'équipage mobile.

L'équipage mobile à miroir affecte deux dispositions. La première (*fig. 9*) comporte deux petits fils d'acier aimantés et verticaux, réunis par deux petites traverses. A la traverse supérieure s'accroche le fil de cocoon ou la fibre de quartz qui supporte l'équipage. Ce fil de suspension est fixé, par son extrémité supérieure, à un treuil disposé en haut d'un tube de verre qui surmonte l'instrument et à l'intérieur duquel passe le fil de suspension.

La seconde disposition (*fig. 10*) comporte quatre petits aimants au lieu de deux. Seules, les extrémités du haut et du bas de cet équipage sont influencées par le courant qui traverse les bobines, les pôles intermédiaires se trouvant en dehors de leur champ d'action. Cette disposition, qui rappelle celle avec pôles conséquents de l'équipage du galvanomètre Broca, donne une astaticité presque parfaite, malgré les différences d'aimantation qui peuvent exister entre les divers fils d'acier.

Les aimants directeurs, au nombre de deux, peuvent se croiser plus ou moins.

Les vis calantes reposent sur des dés en ébonite, afin d'isoler parfaitement le galvanomètre.

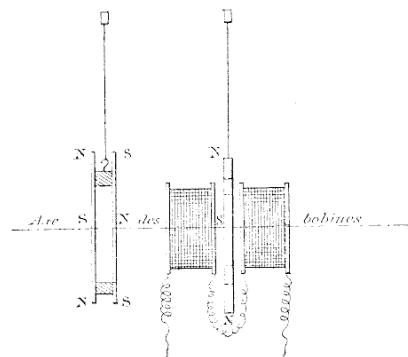


Fig. 7. — Équipage mobile du galvanomètre Broca.

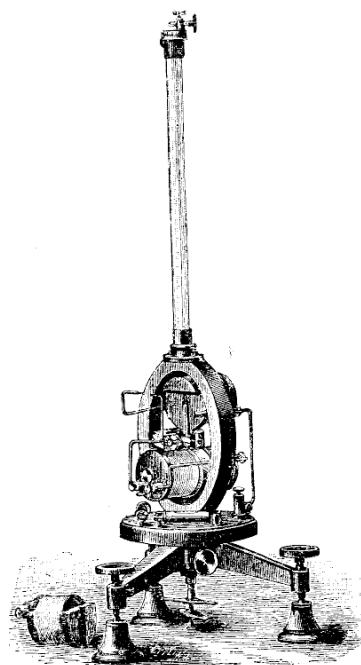


Fig. 8. — Galvanomètre astatique à miroir Hartmann et Braun.

Chacune des quatre bobines a une résistance de 2500 ohms. Ces bobines présentent cette particularité que le diamètre du fil de leur enroulement augmente à mesure que l'on s'éloigne du centre. De cette manière, bien que le diamètre des spires aille en augmentant, chacune d'elles a la même résistance, sa section augmentant en même temps que le diamètre d'enroulement.



FIG. 9. — Équipage mobile du galvanomètre Hartmann et Braun. Première disposition.

Un courant ayant une intensité de $25 \cdot 10^{-10}$ ampère produit une déviation de 1 mm sur une échelle distante de 1 m.

On peut remplacer l'équipage qui vient d'être décrit par un autre formé d'un tube d'acier, long et mince, fendu en deux parties suivant sa longueur. Les deux moitiés de ce tube sont fixées et maintenues écartées par deux traverses, dont l'une sert d'attache au fil de cocon. Le miroir est placé vers le milieu, et la partie inférieure du tube tourne à l'intérieur d'une boîte en cuivre rouge. Ce dispositif d'amortissement

est susceptible d'être réglé jusqu'à l'apéridicité; il suffit d'enlever la boîte en cuivre pour supprimer complètement l'amortissement.

Enfin, on peut substituer aux divers équipages décrits l'équipage lord Kelvin, du modèle bien connu, formé de deux séries de petits aimants horizontaux.

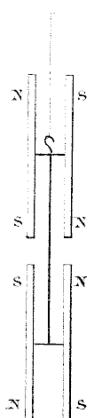


FIG. 10. — Équipage mobile du galvanomètre Hartmann et Braun. Seconde disposition.

Galvanomètre astatique et apériodique à lunette Hartmann et Braun. — Ce galvano-

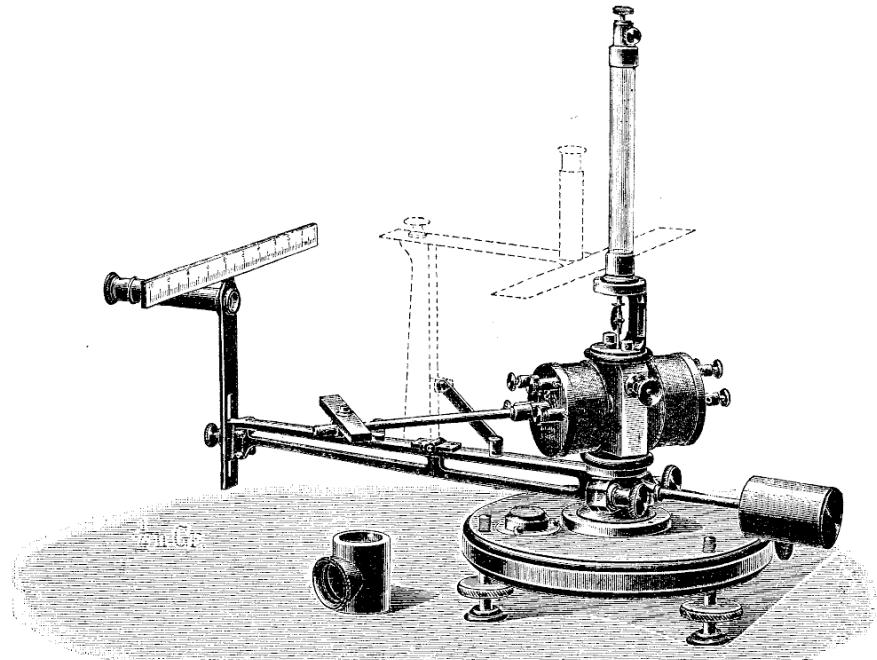


FIG. 11. — Galvanomètre apériodique à miroir Hartmann et Braun.

mètre (fig. 11), construit et exposé par MM. Hartmann et Braun, de Francfort, a un équipage mobile constitué par un aimant en forme de cloche suspendu à un fil de cocon et sur lequel agit

le flux développé par le passage du courant dans deux bobines fixées de part et d'autre de cet aimant. Les bobines sont amovibles et peuvent être facilement remplacées par d'autres, suivant le genre de mesures à effectuer; la résistance totale des diverses séries de bobines est de 4 000, 2 000, 1 000 et 100 ohms. On peut aussi coupler les bobines en série ou en quantité.

L'instrument est monté sur un socle muni de trois vis calantes et d'un niveau à bulle d'air. Autour de l'axe central peut pivoter un chariot porte-lunette, soigneusement équilibré par un contrepoids.

Les oscillations de l'équipage mobile sont amorties jusqu'à l'apéridicité, grâce à l'enveloppe de cuivre qui l'entoure.

Un aimant directeur, placé latéralement à l'extrémité d'un support horizontal, permet de rendre le système presque astatique en annulant en grande partie l'action du champ magnétique terrestre.

La lunette, de 10 mm d'ouverture et de 6 cm de distance focale, donnant un grossissement et une clarté suffisante, est montée ainsi que l'échelle sur un bras articulé que porte le chariot.

La sensibilité de ce galvanomètre est telle que l'on obtient une déviation de 1 mm sur l'échelle avec un courant d'une intensité de 9 microampères et la série de bobines de 100 ohms, sans utiliser l'aimant directeur.

Afin de pouvoir transporter l'instrument sans inconvénient, il est muni d'un dispositif d'arrêt de l'équipage mobile. Il suffit de tourner un bouton moleté pour bloquer l'aimant en forme de cloche.

Galvanomètre astatique Siemens et Halske. — L'équipage mobile de ce galvanomètre est constitué par deux petits aimants en forme de cloche (fig. 42) fixés sur un fil d'aluminium. Ces aimants sont obtenus en étampant un petit disque en acier mince et en lui donnant la forme d'une capsule que l'on découpe ensuite.

Les deux aimants de l'équipage mobile ont leurs pôles orientés suivant SN et ns , de manière à rendre le système astatique; la distance qui les sépare est telle qu'ils se trouvent chacun suspendu à la hauteur du centre de la paire de bobines à laquelle ils sont affectés.

Un miroir m , placé entre les deux aimants, est également fixé sur le fil d'aluminium. Ce dernier est attaché à un long fil de cocon placé et suspendu à l'intérieur du tube vertical qui surmonte les bobines (fig. 43).

Fig. 42. — Équipage mobile du galvanomètre astatique Siemens et Halske.

Les deux paires de bobines fixes de ce galvanomètre sont amovibles et peuvent être rem-

placées par d'autres ayant des résistances appropriées aux mesures à effectuer. On obtient le maximum de sensibilité avec deux paires de bobines, ayant chacune 4 000 ohms de résistance, soit une résistance totale de 16 000 ohms.

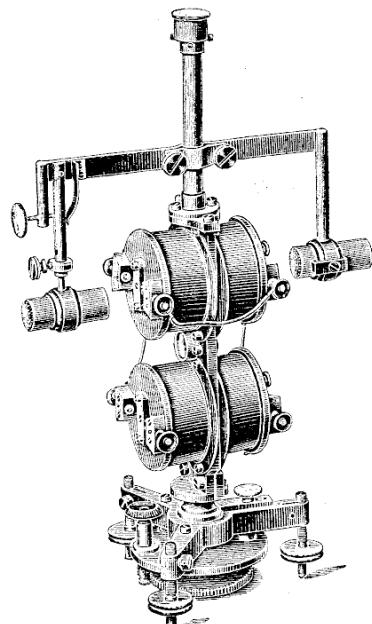
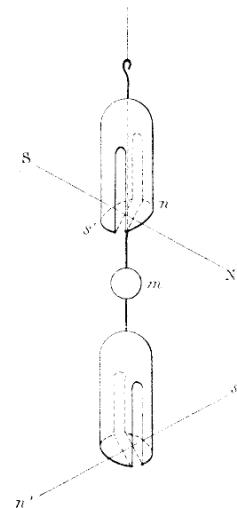


Fig. 43. — Galvanomètre astatique Siemens et Halske.

Ce galvanomètre comporte deux aimants directeurs logés sous le socle de l'instrument entre les vis calantes. Ces aimants sont manœuvrés ensemble ou séparément, à l'aide d'un bouton moletté qui commande un pignon denté. L'emploi de deux aimants directeurs, que l'on peut croiser plus ou moins, remplace avantageusement la disposition qui consistait à donner plus ou moins de sensibilité au galvanomètre en n'utilisant qu'un seul aimant que l'on éloignait ou que l'on rapprochait de l'équipage mobile.

Le bras horizontal qui surmonte les bobines sert de support à deux cylindres de fer doux dont l'un est fixe, tandis que l'autre peut recevoir de très faibles déplacements. Ce dispositif, qui rappelle les masses compensatrices des compas de marine, sert à mettre le galvanomètre à l'abri de l'influence des actions magnétiques extérieures, mais moins complètement, cependant, que ne le ferait une enveloppe circulaire en fer, comme en ont les galvanomètres cuirassés.

La sensibilité du galvanomètre astatique Siemens et Halske, avec bobines ayant 16 000 ohms de résistance, est telle qu'un courant de $0,6 \cdot 10^{-9}$ ampère produit une déviation de 1 mm sur une échelle placée à 1 mètre de distance.

Galvanomètres cuirassés du Bois-Rubens. — Ces galvanomètres, construits et exposés par la Société Siemens et Halske, de Berlin, ont été étudiés en vue d'obtenir une très grande sensibilité et d'éviter l'influence des actions magnétiques extérieures.

Il se construit deux modèles de ce galvanomètre (fig. 14).

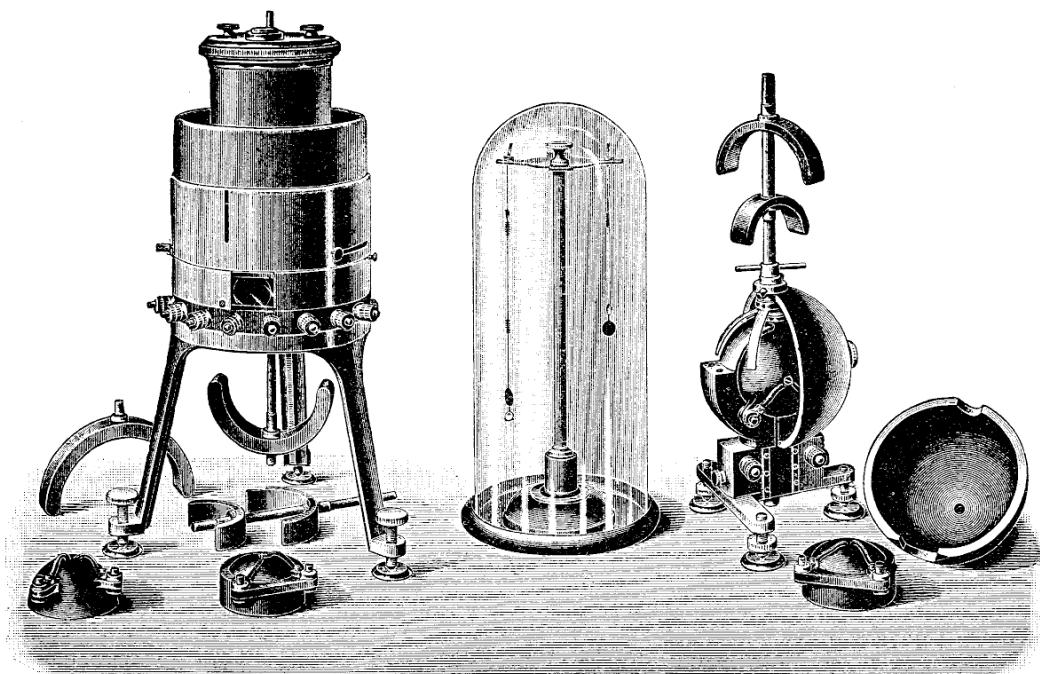


FIG. 14. — Galvanomètres cuirassés du Bois-Rubens.

L'équipage mobile est constitué par de petites aiguilles aimantées, collées derrière un petit miroir, comme dans les galvanomètres lord Kelvin ; cet équipage est porté par un fil de cocon sans torsion. Chaque galvanomètre est muni de deux équipages mobiles que l'on voit, sous une cloche en verre, sur la figure 14. L'un est l'équipage ordinaire ; l'autre, excessivement léger, est utilisé toutes les fois que l'on veut obtenir la sensibilité maximum de l'instrument.

Dans le petit modèle, qui ne comporte qu'une paire de bobines et qui est représenté figure 14 sur la droite, les bobines sont placées à l'intérieur d'enveloppes hémisphériques en acier coulé.

Autour de la première sphère, constituée par deux de ces enveloppes, se trouvent deux aimants directeurs recourbés en arc de cercle, ce qui leur permet de se mouvoir entre la sphère centrale et une seconde sphère extérieure en fer qui entoure complètement la première, à une distance de 25 mm. Au-dessus de cet ensemble, une tige verticale supporte deux autres aimants directeurs pouvant glisser à frottement doux sur la tige leur servant de support.

Dans le grand modèle de galvanomètre, représenté sur la gauche de la figure 14 et qui comporte deux paires de bobines fixes, les deux enveloppes concentriques en fer sont cylindriques, l'enveloppe intérieure pouvant tourner sur elle-même et l'enveloppe extérieure pouvant se déplacer verticalement.

Cet instrument comporte, en outre, quatre aimants directeurs extérieurs pouvant se croiser plus ou moins; deux sont mobiles sur une tige inférieure; les deux autres peuvent glisser sur un tube surmontant les bobines et à l'intérieur duquel se trouve le fil de suspension de l'équipage.

Chaque galvanomètre est livré avec une série de quatre bobines facilement amovibles et que l'on peut remplacer par d'autres, de résistances différentes. Les trois séries comportent chacune quatre bobines ayant respectivement des résistances de 2 000, 100 ou 5 ohms.

Ces galvanomètres sont très sensibles. C'est ainsi que, lorsque la durée d'oscillation est de cinq secondes et que l'échelle est placée à 2 m du miroir, on obtient, avec le galvanomètre grand modèle muni de son équipage léger, une déviation de 1 000 mm avec un courant d'une intensité de 1 microampère.

Les cuirasses en fer dont sont munis ces galvanomètres doivent, pour exercer une protection efficace, avoir une épaisseur minimum de 6 mm.

Microgalvanomètre astatique Rosenthal. — Le Dr Th. Edelmann, de Munich, exposait cet instrument (fig. 15), qui dérive du galvanomètre lord Kelvin.

L'équipage mobile comporte un aimant en forme de Z, étroit et relativement haut, dont les branches horizontales ont même polarité; un pôle conséquent se trouve au milieu de la branche verticale (fig. 16).

Les branches horizontales de cet aimant pénètrent au milieu des bobines R_1 et R_2 , dont les bornes d'entrée se trouvent en e et en f . Ces bobines s'appliquent sur un anneau F fixé sur le socle T et sont maintenues par les vis g et h . Cette disposition permet de remplacer rapidement les bobines par d'autres de résistance appropriée aux mesures à effectuer et aussi d'avoir accès à l'équipage mobile. Une cage en fer G met l'instrument à l'abri des influences magnétiques extérieures.

Au-dessus de l'anneau F se trouve la chambre du miroir, fermée par des bonnettes et formant amortisseur à air. Le miroir reçoit le rayon lumineux par l'ouverture L et le renvoie sur l'échelle par l'ouverture K .

Au-dessus de la chambre du miroir se trouve le tube V , qui supporte un autre tube concen-

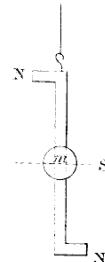


FIG. 16. — Équipage du microgalvanomètre Rosenthal.

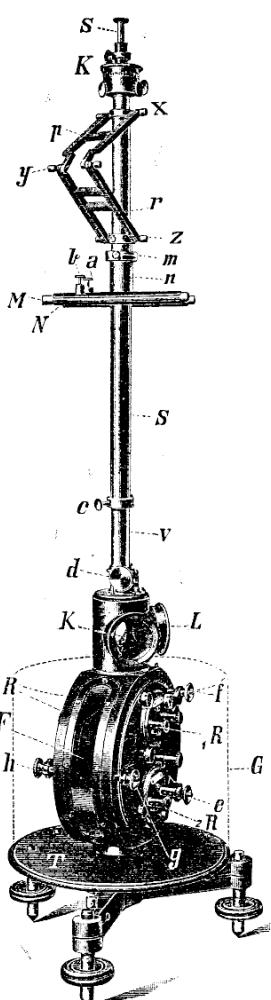


FIG. 15.
Microgalvanomètre Rosenthal.

trique SS. Une vis tangente *d* permet de faire tourner le tube V autour de son axe. Le fil de cocon ou la fibre de quartz, supportant l'équipage mobile, s'enroule sur un petit treuil K qui en porte enroulée une certaine longueur.

Le tube S peut s'abaisser ou se relever d'une certaine quantité, permettant ainsi l'emploi d'un fil de suspension plus ou moins long. Un parallélogramme articulé ZypX limite la course de ce mouvement télescopique et des colliers d'arrêt *c* et *m* immobilisent le tube dans la position voulue.

Deux aimants directeurs cylindriques MN coulissent dans des tubes fendus, soudés sur le tube S leur servant de support. Des vis de pression *a* et *b* permettent de les fixer dans la position qu'on leur a donnée. En faisant sortir ces aimants de leur gaine, l'un vers la gauche, l'autre vers la droite, on allonge le système directeur et l'on augmente son effet; lorsque, au contraire, ces aimants sont rentrés dans leur gaine, le système directeur n'agit plus, car les pôles en regard sont de signes contraires.

Lorsqu'on agit sur le treuil K dans le sens convenable, on allonge le fil de suspension et, par conséquent, on augmente la sensibilité de l'instrument. En même temps, une crémaillère fait monter le tube d'une même quantité, de telle sorte que le miroir reste toujours à la même hauteur, quelles que soient les variations de longueur du fil de suspension.

Ce galvanomètre a une sensibilité telle que l'on obtient une déviation de 1 mm sur une échelle placée à 1 m, lorsque l'intensité du courant qui traverse les bobines a seulement une valeur de $0,1 \cdot 10^{-12}$ ampère.

Galvanomètres Wiedemann. — Plusieurs galvanomètres genre Wiedemann figuraient à l'Exposition; ils étaient exposés par MM. E. Ducretet, de Paris; Hartmann et Braun, de Francfort, et Edelmann, de Munich.

MODÈLE E. DUCRETEL. — Le galvanomètre Wiedemann-d'Arsonval, construit et exposé par

M. E. Dueret (fig. 47), peut être utilisé à volonté comme galvanomètre apériodique ou comme galvanomètre balistique.

L'équipage mobile est constitué par un petit aimant A, en forme de fer à cheval, fixé à l'extrémité de la tige *t* qui porte le miroir M. Cet équipage est suspendu à l'aide d'un fil de cocon sans torsion.

Le miroir M est placé à l'intérieur d'un tambour fermé par une glace et peut recevoir toutes les orientations sans qu'il soit nécessaire de toucher aux autres organes de l'instrument.

Pour rendre l'instrument apériodique, on amortit les oscillations de l'équipage mobile en plaçant l'aimant A dans une cavité creusée dans une masse de cuivre rouge. Lorsqu'on veut utiliser l'instrument comme galvanomètre balistique, on enlève la masse de cuivre pour permettre aux oscillations

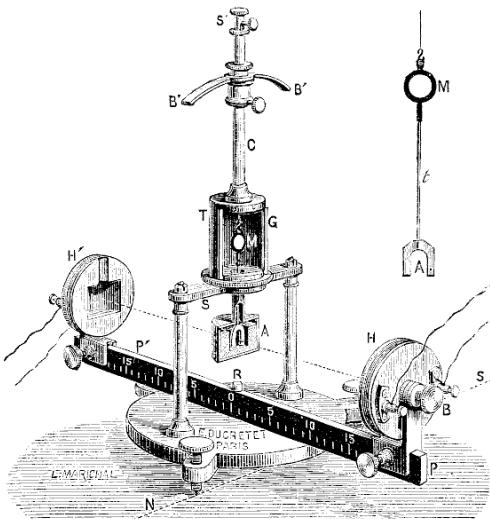


FIG. 47. — Galvanomètre Wiedemann-d'Arsonval.

de s'effectuer librement; en agissant convenablement sur l'aimant directeur, on obtient des oscillations suffisamment lentes.

La bobine est divisée en deux parties qui peuvent se déplacer le long d'une règle divisée, permettant ainsi de faire varier à volonté la sensibilité de l'instrument. On peut également avoir plusieurs bobines ayant une résistance plus ou moins grande.

Un aimant directeur BB' sert à faire varier, suivant les besoins, l'intensité et la direction du champ.

MODÈLE HARTMANN ET BRAUN. — Dans ce galvanomètre (fig. 18), l'équipage mobile comporte un aimant, en forme de cloche, de dimensions très réduites. La masse de cuivre de l'amortisseur a été considérablement diminuée sans nuire à l'apérioridicité, ce qui a permis de rapprocher les bobines des pôles de l'aimant et d'augmenter ainsi la sensibilité de l'instrument.

La résistance totale des deux demi-bobines couplées en série est de 400 ohms. Elles peuvent être déplacées le long d'une règle graduée à l'aide d'une crémaillère. Un écran en fer doux entoure l'ensemble de la partie mobile et la protège contre les actions magnétiques extérieures. Cet écran est formé de deux anneaux épais pouvant tourner l'un par rapport à l'autre, afin de croiser les pôles qu'ils pourraient présenter et d'annuler leurs effets.

L'enroulement des bobines est fait avec un double fil, ce qui permet d'obtenir divers couplages et, par suite, diverses résistances, qui sont la moitié, le quart, le huitième ou le seizième de la résistance totale. Des bornes fixées sur chaque demi-bobine facilitent l'opération des divers couplages désirés et leur mode de montage a été étudié pour que l'on puisse les remplacer facilement par d'autres.

Un aimant directeur, monté sur un collier en

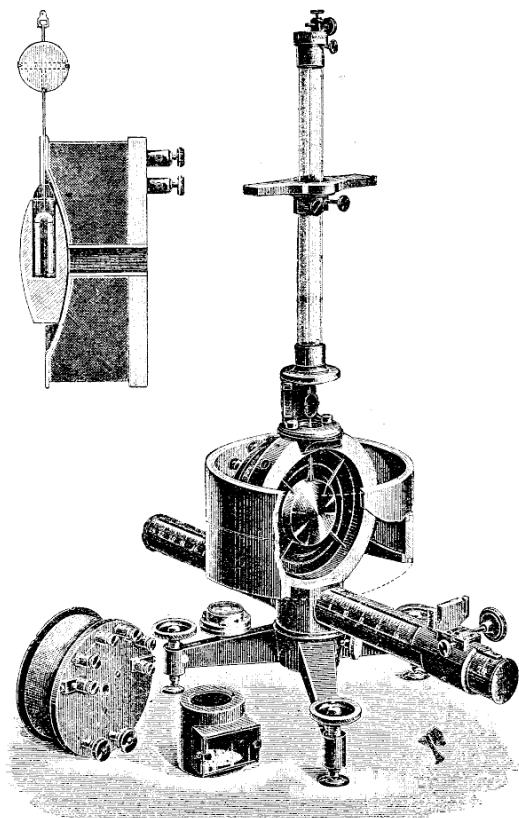


FIG. 18. — Galvanomètre aperiodique Hartmann et Braun, grand modèle.

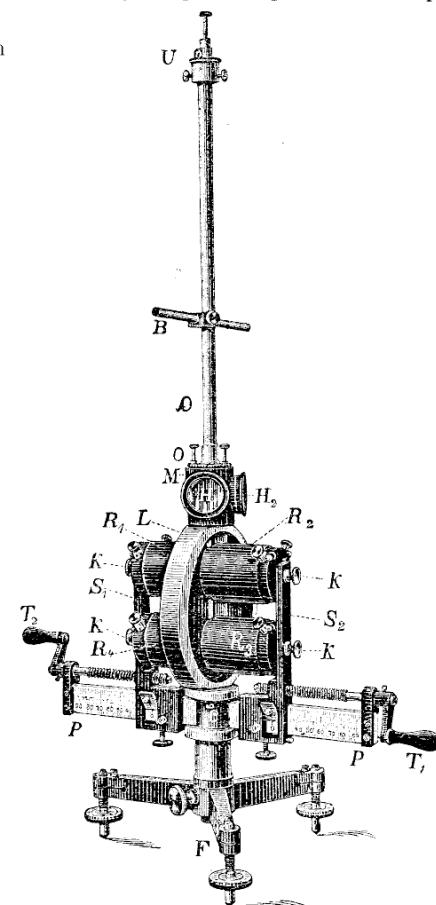


FIG. 19. — Galvanomètre Wiedemann, modèle Edelmann.

laiton, est mobile sur le tube de cristal qui renferme le fil de suspension de l'équipage mobile.

Ce galvanomètre, avec les enroulements groupés en série, par conséquent, ayant une résistance de 400 ohms, l'écran de fer doux étant enlevé, a une sensibilité telle que l'on obtient une déviation de 1 mm sur une échelle placée à 4 m, avec un courant d'une intensité de $0,8 \cdot 10^{-7}$ ampère.

MODÈLE EDELMANN. — La figure 19 montre le galvanomètre construit et exposé par le Dr Edelmann, de Munich.

L'aimant, en forme de cloche, est suspendu par une fibre de quartz enfermée dans un tube OU, le long duquel peut se déplacer un aimant directeur B.

Les bobines R_1 , R_4 et R_2 , R_3 sont fixées par des vis K sur les chariots S_1 , S_2 . Ces chariots coulissent le long d'une règle graduée PP et peuvent recevoir un déplacement micrométrique lorsqu'on agit sur les manivelles T_1 , T_2 . La distance qui sépare les chariots de l'équipage mobile s'apprécie très exactement au moyen des verniers dont ils sont munis.

L'ensemble de l'instrument peut tourner autour de son axe pour obtenir l'orientation convenable.

Le miroir se trouve protégé par une chambre munie de deux bonnettes H_1 et H_2 . L'aimant de l'équipage mobile se meut à l'intérieur d'une cavité ménagée dans un bloc de cuivre rouge qui produit l'amortissement et qu'on peut enlever à volonté après avoir écarté les bobines.

La déviation obtenue sur une échelle placée à 1 m du miroir atteint 300 mm, lorsque les bobines sont complètement rapprochées de l'équipage mobile, c'est-à-dire lorsque l'instrument a son maximum de sensibilité.

GALVANOMÈTRES A AIMANT FIXE ET A BOBINE MOBILE

Galvanomètres Deprez-d'Arsonval. — Les galvanomètres Deprez-d'Arsonval, à aimant fixe et à bobine mobile, sont aujourd'hui très employés et tous les constructeurs d'instruments de mesure ont réalisé des modèles basés sur le principe du galvanomètre qui a servi de type.

MODÈLES J. CARPENTIER. — La figure 20 représente un galvanomètre Deprez-d'Arsonval à miroir, construit par M. J. Carpentier.

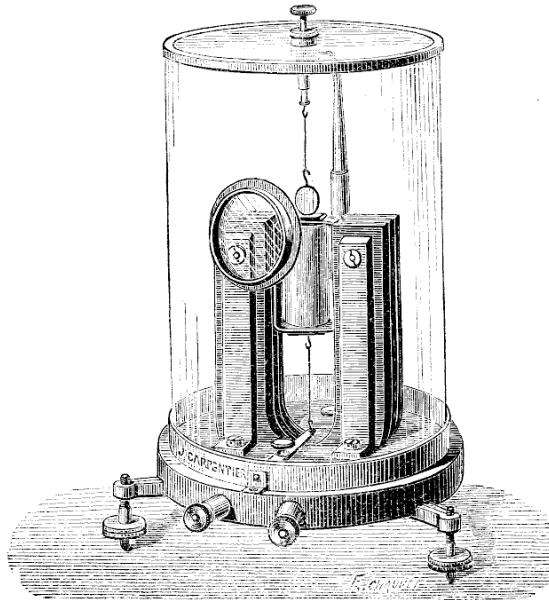


FIG. 20. — Galvanomètre Deprez-d'Arsonval, à miroir, modèle J. Carpentier.

que porte une potence métallique fixée sur le socle de l'instrument ; cette tige mobile peut être élevée ou abaissée, afin de placer le cadre à la hauteur convenable, et aussi recevoir un mouvement de rotation pour orienter l'équipage mobile et l'amener au zéro de l'échelle. Le fil de suspension du bas vient s'attacher, par son extrémité inférieure, à une lame élastique dont la tension peut être réglée par une vis.

Les deux fils de suspension servent en même temps de conducteurs et, à cet effet, une de

leurs extrémités est reliée à une des bornes du galvanomètre par l'intermédiaire de la potence métallique, d'une part, et de la lame élastique, de l'autre, tandis que les extrémités opposées sont reliées au cadre galvanométrique.

Le couple qui résulte de la torsion des fils de suspension, sous l'action des déviations angulaires du cadre, sert à mesurer l'action réciproque de l'aimant et du cadre, lorsque ce dernier est parcouru par un courant. Le cadre porte à sa partie supérieure un petit miroir qui permet de mesurer les angles de torsion avec une grande précision par la méthode objective.

Le cadre galvanométrique de ce modèle d'instrument pour mesures courantes a une résistance de 200 ohms environ. Un courant de 0,5 microampère donne une déviation de 1 mm sur une échelle placée à 1 m de distance du miroir.

La production de courants induits dans le cadre, par suite de ses mouvements dans le champ magnétique de

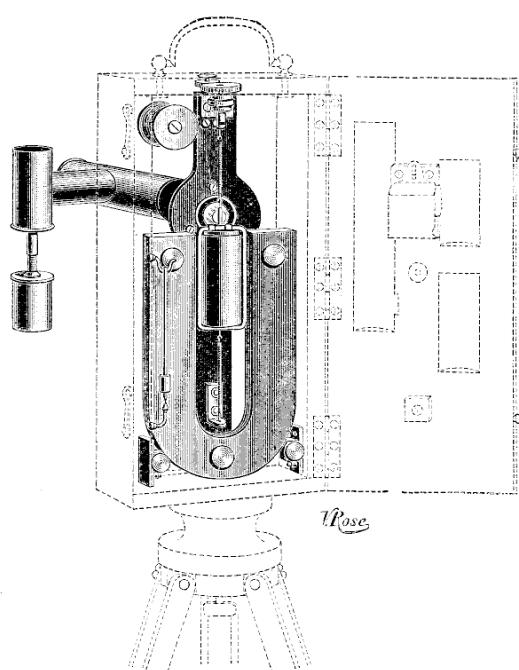


Fig. 21. — Galvanomètre à microscope, modèle J. Carpentier.

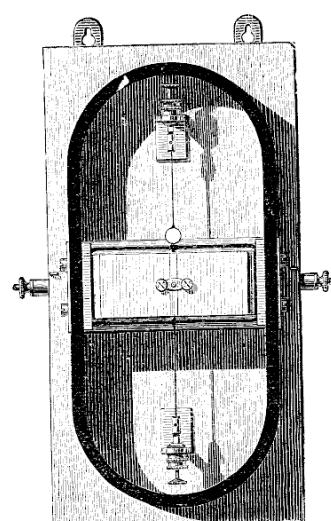


Fig. 22. — Galvanomètre balistique Deprez-d'Arsonval, modèle J. Carpentier.

l'aimant, détermine l'apéridicité du galvanomètre, lorsque la résistance totale du circuit a une valeur convenable.

M. J. Carpentier avait exposé une série de galvanomètres Deprez-d'Arsonval de construction analogue. Dans certains modèles, le miroir est remplacé par une aiguille indicatrice qui se déplace devant une graduation; dans d'autres, soit à miroir, soit à aiguille indicatrice, le galvanomètre est différentiel et la bobine mobile comporte alors naturellement deux enroulements. Un autre modèle a une suspension unifilaire, le retour du courant s'effectuant par l'intermédiaire d'un contact à mercure. Enfin, un modèle spécial, destiné aux mesures pyrométriques (fig. 21), comporte un microscope permettant de lire facilement les plus faibles déviations.

Le galvanomètre balistique que représente la figure 22 est également du système Deprez-d'Arsonval; on a rendu plus grand le moment d'inertie en augmentant le nombre de tours de l'enroulement de la bobine mobile et aussi ses dimensions. Le cadre mobile est très allongé dans le sens horizontal et une forte masse de fer doux, placée à son intérieur, sert à diminuer la réductance magnétique. La forme des aimants fixes a été également modifiée pour permettre de placer le cadre; les deux aimants, en forme d'U, sont disposés bout à bout de manière à obtenir des pôles conséquents; ils sont réunis par deux plaques de fer.

La durée d'oscillation est d'environ 8 à 10 secondes, ce qui permet d'employer cet instru-

ment pour les mesures d'inductance, même lorsque les bobines essayées contiennent du fer. La sensibilité de l'instrument est telle qu'un microcoulomb donne, à circuit ouvert, une élévation de 40 à 50 mm sur une échelle distante de 1 m et qu'un courant de 0,01 microampère produit une déviation de 1 mm.

La résistance d'amortissement critique est d'environ 4 000 ohms, soit huit fois celle de la bobine mobile qui a 300 ohms de résistance.

MODÈLES E. DUCRETEL. — Dans les galvanomètres Deprez-d'Arsonval construits par M. E. Ducretel (fig. 23), le champ magnétique est très puissant; il est obtenu par une série de six aimants circulaires disposés horizontalement et auxquels sont fixés des pièces polaires. Le cadre mobile a une résistance de 350 ohms. La suspension de ce cadre galvanométrique est constituée par deux fils fins métalliques, fixés aux montures extrêmes S et T qui permettent de leur donner la tension convenable. Ces deux fils, passant par le centre de gravité du cadre mobile, forment un véritable axe fixe autour duquel le cadre peut prendre un mouvement de rotation; ils servent en même temps à amener le courant à la bobine.

La suspension du cadre est symétrique, c'est-à-dire que les fils de suspension, placés au-dessus et au-dessous, ont même longueur et même diamètre et, par suite, donnent des couples de torsion égaux. A l'intérieur du cadre est une pièce de fer doux I, en forme de cylindre creux, destinée à augmenter le flux qui traverse la bobine mobile.

Les lectures se font soit à l'aide du miroir et d'une échelle, soit directement sur un cadran divisé C.

Ce galvanomètre est apériodique et très sensible. On obtient une déviation de 17,3 mm sur une échelle placée à 1 m avec un courant ayant une intensité de 1 microampère.

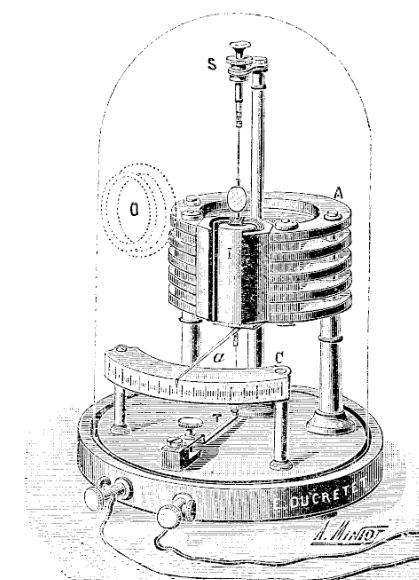


Fig. 23. — Galvanomètre Deprez-d'Arsonval, modèle E. Ducretel.

Pour certaines applications spéciales, telles que la pyrométrie industrielle, M. E. Ducretel a adapté un dispositif enregistreur au galvanomètre qui vient d'être décrit. Ce dispositif laisse à l'équipage du galvanomètre toute sa mobilité et sa légèreté et à l'instrument toute sa sensibilité.

La figure 24 montre l'ensemble de ce galvanomètre enregistreur. L'équipage mobile du galvanomètre porte une aiguille légère en aluminium qui se termine par un petit encier e, servant de plume inscrivante; la pointe de cet encier-plume est amenée facilement, à l'aide de vis de réglage, à une faible distance du papier quadrillé, fixé sur le cylindre enregistreur H. Ce cylindre enregistreur est commandé par un mouvement d'horlogerie effectuant un tour complet en 26 heures; la large bande de papier quadrillé qu'il reçoit est divisée en 24 heures, laissant ainsi une partie libre, qui est recouverte par la bande d'attache a. Cette feuille doit être enlevée tous les jours et remplacée par une autre. Comme dans tous les enregistreurs, les traits verticaux (génératrices du cylindre) donnent la valeur du temps en heures et fractions d'heure. Les traits horizontaux donnent la valeur de toutes les parties de la courbe inscrite en fonction du temps.

Le mouvement d'horlogerie commande une roue à rochet R et le nombre de dents de cette roue est tel que la came qui suit son mouvement fait une chute brusque, toutes les minutes environ. Le cadre P est solidaire de cette came; deux ressorts lui assurent une certaine flexibilité et des vis de réglage permettent d'amener les bords de ce cadre assez près de l'aiguille, mais sans y toucher. A chaque chute de la came, par suite du passage d'une dent à la suivante, la

vitesse acquise et la flexibilité du cadre amènent ce dernier au contact de l'aiguille pendant un instant et l'encre de la plume *e* laisse alors la trace de son contact momentané sur le papier qui est disposé sur le tambour *H*. L'aiguille indicatrice du galvanomètre reprend aussitôt la position exacte que lui donne la valeur de l'intensité du courant circulant dans la bobine mobile.

Le tracé intermittent ainsi obtenu donne une courbe exacte et la sensibilité du galvanomètre n'est nullement affectée.

Un shunt approprié, placé en dérivation dans le circuit du galvanomètre, permet de ramener l'amplitude des déviations dans les limites imposées par la largeur du papier quadrillé.

Dans les premiers modèles de ce type, le tambour enregistreur n'actionnait pas lui-même le cadre *P* par une came. Ce cadre était abaissé par l'attraction de l'armature d'un électro-

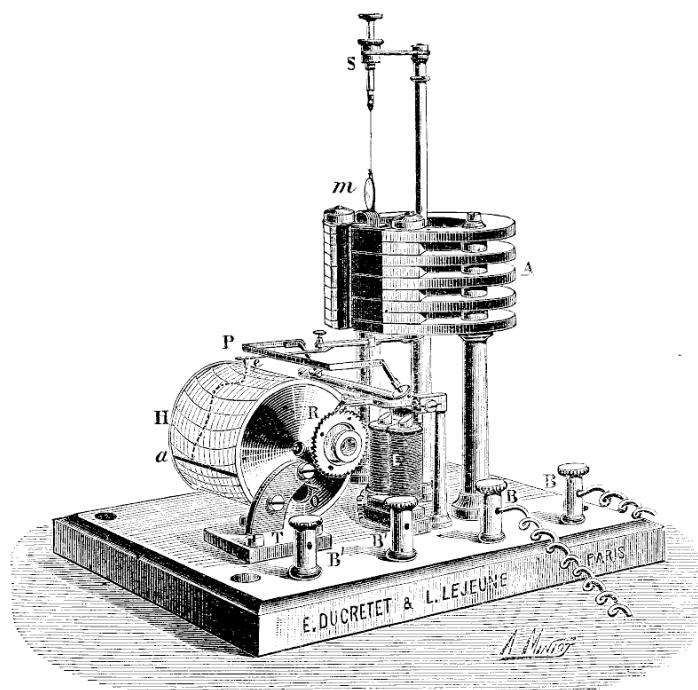


FIG. 24. — Galvanomètre enregistreur Ducretet.

aimant *E* dans lequel on envoyait un courant temporaire, chaque fois qu'on voulait produire une inscription. Le fonctionnement automatique et périodique de la came *R* dispense de cette sujexion.

Modèles Edelmann. — Le Dr Edelmann, de Munich, avait exposé plusieurs modèles de galvanomètres genre Deprez-d'Arsonval.

Le modèle de grande sensibilité, que montre la figure 25, comporte un aimant fixe, formé de plusieurs barreaux droits *M*, réunis par une série de tôles formant culasse, et supporté par une potence *P*. Entre les pôles de cet aimant est disposée une cage vitrée, à l'intérieur de laquelle se trouve la bobine mobile.

L'équipage mobile comprend un support *KR* (fig. 26), la bobine mobile *r*, un miroir *s*, un noyau de fer doux *E* et les fils de suspension *g*, *u*; le fil de suspension inférieur est souvent remplacé par un ressort en boudin afin de diminuer le couple antagoniste et d'augmenter, par suite, la sensibilité de l'instrument.

Les fils de suspension, inférieur et supérieur, peuvent être tendus séparément, à l'aide des vis *d* et *T*. Le courant entre par *a* et sort par *u*.

Ce galvanomètre est très sensible. Avec une bobine mobile ayant une résistance de 600 ohms, on obtient une déviation de 200 mm sur une échelle distante de 1 mètre pour une intensité de courant de 1 microampère.

Employé comme galvanomètre balistique, en supprimant l'amortisseur, on obtient une durée d'oscillation de 15 secondes pour une période complète, lorsque le fil de suspension inférieur est remplacé par un ressort en boudin.

Le modèle industriel, que représente la figure 27, affecte une forme différente. Il est un peu moins sensible que le précédent, mais il est de construction plus simple.

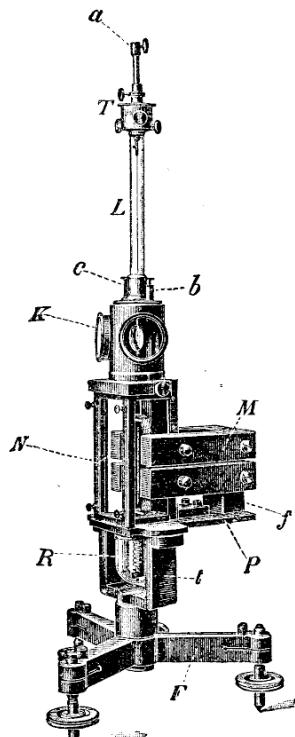


FIG. 23. — Galvanomètre Deprez-d'Arsonval, modèle Edelmann.

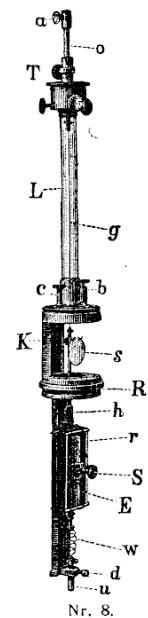


FIG. 26. — Équipage mobile du galvanomètre Deprez-d'Arsonval, modèle Edelmann.

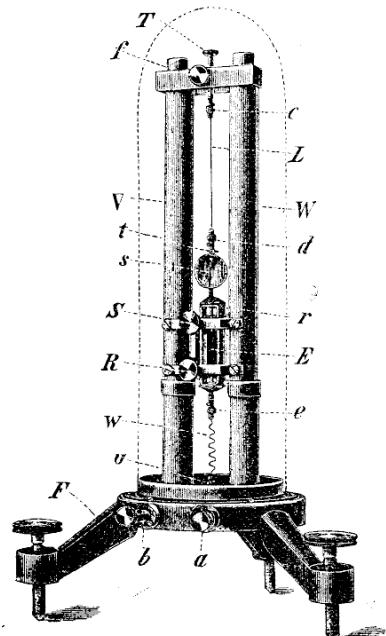


FIG. 27. — Galvanomètre Deprez-d'Arsonval, modèle industriel de M. Edelmann.

L'instrument est monté sur un socle en ardoise muni de vis calantes et de deux bornes *a* et *b*.

L'aimant fixe est constitué par deux barreaux aimantés V, W, disposés verticalement et réunis à leur partie supérieure par une culasse en fer f . Ces barreaux sont simplement en acier rond étiré, ce qui rend leur assemblage très économique. Vers la partie inférieure sont fixées les pièces polaires et le noyau de fer doux E. Dans le champ magnétique ainsi formé oscille la bobine mobile r , dont la suspension supérieure est constituée par un fil d'argent L, fixé en c et en d , et la suspension inférieure, par un ressort en boudin W, attaché en e et en u .

Une cloche en verre protège l'instrument. Quand la bobine est traversée par un courant d'une intensité de 1 microampère, on obtient une déviation de 130 mm sur une échelle placée à 1 m.

MODÈLES HARTMANN ET BRAUN. — Ces instruments (*fig. 28*) comportent un système formé de trois aimants fixes en fer à cheval, dont l'acier est pris dans des barres cylindriques. Les pôles de ces aimants pénètrent dans des logements pratiqués dans les pièces polaires, ce qui facilite la construction.

La bobine ou cadre mobile, suspendu par des fils fins en argent, a deux enroulements, dont l'un est utilisé pour les mesures et l'autre, shunté par des résistances convenables, sert à régler l'amortissement des oscillations. Ce second enroulement ne comporte qu'un petit nombre de spires et rend l'instrument apériodique, quelle que soit la résistance du circuit dont fait partie le premier.

Les cloches en verre qui protègent les galvanomètres Hartmann et Braun méritent une mention spéciale. Comme d'ordinaire, elles sont cylindriques et portent une fenêtre plane en verre fixée, au moyen d'une bonnette, à la hauteur du miroir.

Quand le plan de la fenêtre est vertical, il se produit sur l'échelle des réflexions multiples qui rendent les lectures assez incommodes, ces réflexions troubant l'obscurité relative dans laquelle les échelles translucides doivent se trouver.

La maison Hartmann et Braun évite très simplement cet inconvénient en inclinant un peu sur la verticale le plan du verre de la fenêtre. Les réflexions gênantes sont ainsi renvoyées hors de la direction de l'échelle.

Le même modèle de galvanomètre se construit également avec aiguille indicatrice.

MODÈLE SIEMENS ET HALSKE. — Dans ce modèle de galvanomètre (fig. 29), les aimants fixes, au nombre de six, ont la forme d'un fer à cheval et sont munis de pièces polaires disposées de manière à rendre le champ magnétique uniforme dans l'entrefer ménagé entre elles et le cylindre de fer doux placé à l'intérieur de la bobine mobile.

Le cadre ou bobine mobile est suspendu par un fil d'argent logé à l'intérieur du tube vertical qui surmonte les aimants. Un ressort en boudin maintient la partie inférieure du cadre.

Tout cet ensemble est placé dans une chape qui supporte le tube supérieur et le cylindre de fer doux ; cette chape porte également la boîte qui protège le miroir et qui se glisse dans un logement ménagé dans les aimants. Un prisonnier empêche le déplacement de toute cette partie amovible. Grâce à cette disposition, il est facile de substituer un cadre à un autre pour obtenir la sensibilité voulue.

Ce galvanomètre est muni d'un shunt magnétique permettant de faire varier sa sensibilité de 40 000 environ. Il est constitué par une pièce de fer que l'on peut rapprocher ou éloigner des pôles des aimants en manœuvrant la vis que porte un étrier placé à la hauteur de ces pôles.

Avec le cadre mobile le plus sensible, on obtient une déviation de 1 mm sur une échelle distante de 1 mètre avec un courant ayant une intensité de $8,5 \cdot 10^{-10}$ ampère.

MODÈLE BIFILAIRE CROMPTON ET C^{ie}. — MM. Crompton et C^{ie}, de Londres, exposaient un galvanomètre à miroir d'une très grande sensibilité, pouvant être utilisé pour les mesures par la méthode de réduction à zéro et aussi comme galvanomètre balistique.

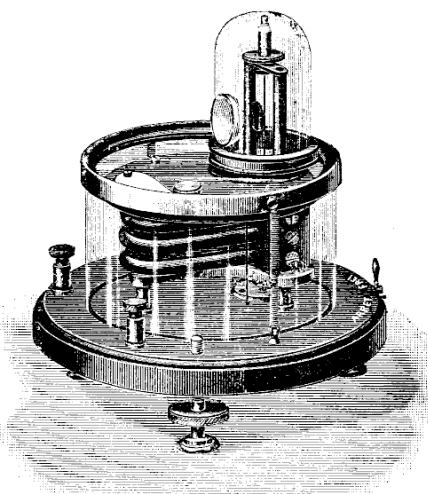


Fig. 28. — Galvanomètre Deprez-d'Arsonval à miroir, modèle Hartmann et Braun.

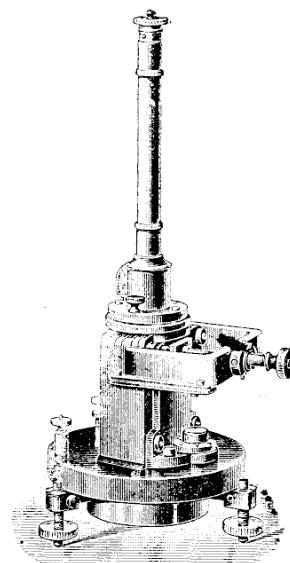


Fig. 29. — Galvanomètre Deprez-d'Arsonval, modèle Siemens et Halske.

Les aimants, en forme d'anneau, sont placés à plat et superposés au nombre de quatre (*fig. 30*) ; les pôles sont amincis afin de concentrer le flux dans un espace aussi réduit que possible.

La colonne centrale de l'instrument sert de support pour l'équipage mobile et aussi pour un disque de fer doux placé entre les pôles.

La bobine mobile a la forme d'un anneau et les extrémités de l'enroulement sont soudées à deux crochets qui servent à la suspendre. Cette suspension bifilaire rend l'instrument très sensible et sert en même temps à amener le courant à la bobine.

La longueur du bifilaire peut être modifiée au moyen d'un chevalet qui coulisse sur la colonne centrale. L'écart des fils de suspension peut également être modifié en manœuvrant le treuil sur lequel ils sont attachés.

Pour que l'instrument fonctionne régulièrement, il est nécessaire de le placer bien verticalement afin que la bobine mobile ne vienne pas toucher les pôles de l'aimant fixe.

MODÈLES CHAUVIN ET ARNOUX. — MM. Chauvin et Arnoux avaient exposé deux modèles de galvanomètres Deprez-d'Arsonval.

Le premier (*fig. 31*) a un équipage mobile suspendu à un ressort en boudin très flexible, ce

qui permet de transporter l'instrument sans risquer de briser la suspension. L'enroulement, en fil de cuivre ou de mallechort, est, suivant le cas, à grande ou à faible résistance.

L'équipage mobile est muni d'une aiguille qui se déplace sur un cadran, qui peut être gradué soit en millivolts, soit en milliampères, le zéro de la graduation pouvant être placé soit à une extrémité de l'échelle, soit au milieu, lorsque l'instrument doit être utilisé pour des mesures comportant la méthode de réduction à zéro.

Le socle est muni de trois vis calantes qui permettent, avec l'aide de la tête de torsion et du bouton de réglage en hauteur, de bien déterminer la position du cadre dans le champ pour que l'aiguille oscille librement.

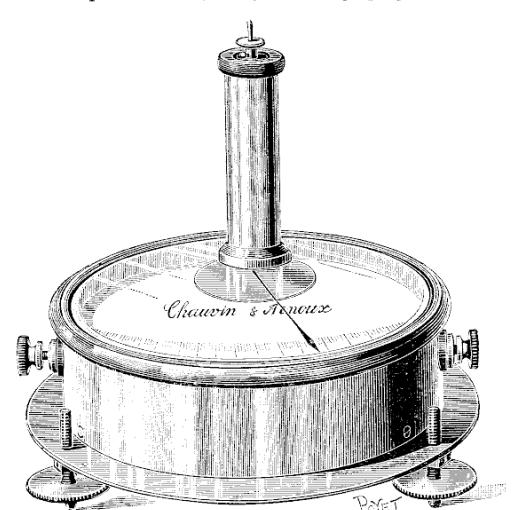


FIG. 30. — Galvanomètre Deprez-d'Arsonval bifilaire, modèle Crompton.

Le second modèle (*fig. 32*) est un galvanomètre Deprez-d'Arsonval à miroir de dimensions très réduites et, par conséquent, facile à transporter, même dans une poche de vêtement.

Le foyer du miroir permet d'effectuer les lectures sur une règle transparente ordinaire placée à 1 mètre, si on préfère son emploi à celui de la règle livrée avec l'instrument et qui est généralement placée à 33 cm, sur un support démontable en trois pièces, auquel est suspendu également le galvanomètre par un joint à la Cardan.

A la distance de 33 cm, on obtient une déviation d'une division pour 0,1 microampère, la résistance de la bobine mobile étant d'environ 100 ohms.

On peut utiliser avec ce galvanomètre le réducteur universel que l'on voit sur la figure 32 et que l'on peut établir de manière à obtenir exactement 0,000 000 1 ampère par division, des prises de courant permettant de faire varier la sensibilité dans les rapports $\frac{1}{1}$, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{1000}$ et $\frac{1}{40000}$.

MM. Chauvin et Arnoux ont également construit une résistance de 1 mégohm, fractionnée

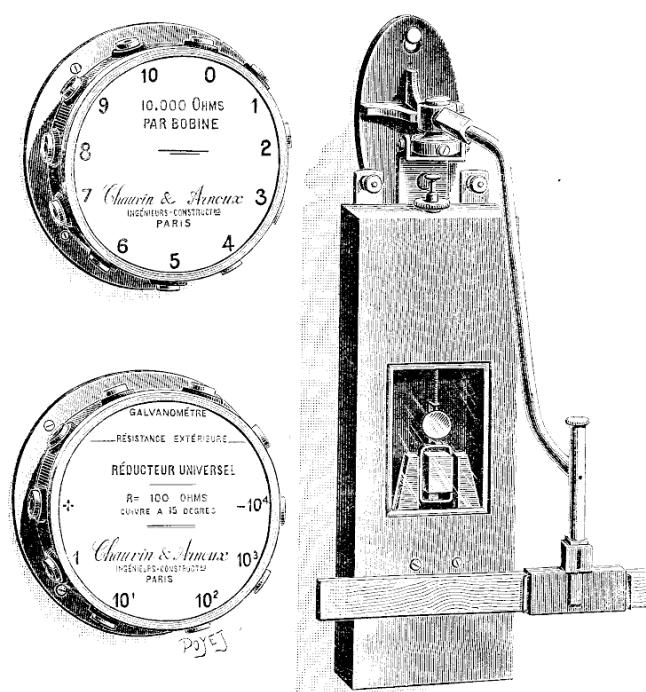


Fig. 32. — Galvanomètre Deprez-d'Arsonval à miroir, modèle transportable, Chauvin et Arnoux.

en 10 bobines de 100 000 ohms, que l'on peut employer avec ce galvanomètre pour effectuer des mesures de résistance d'isolement.

Galvanomètre enregistreur à relais Callendar. — Cet instrument (fig. 33), exposé par la *Cambridge Scientific Instrument Co.*, de Cambridge, Angleterre, enregistre graphiquement les variations des diverses quantités physiques qui peuvent se déduire d'une mesure de résistance ou d'une détermination de différence de potentiel. C'est ainsi qu'il est possible de l'utiliser pour tracer la courbe des variations de consommation d'énergie électrique d'un réseau de distribution.

La figure 34 montre schématiquement la disposition des communications.

Sur une planchette verticale se trouve un pont de Wheatstone, placé à la partie inférieure et comprenant les bornes + et — de la pile, les bornes C et P où s'attachent les extrémités du circuit dont on veut mesurer les variations de résistance, la clé de pile B et la clé M du circuit des relais (fig. 33).

La résistance variable du pont est constituée par un fil calibré le long duquel se déplace

un curseur D (fig. 34), mû par un chariot spécial qui porte, en outre, la plume inscrivant les courbes sur un grand tambour horizontal actionné par un mouvement d'horlogerie.

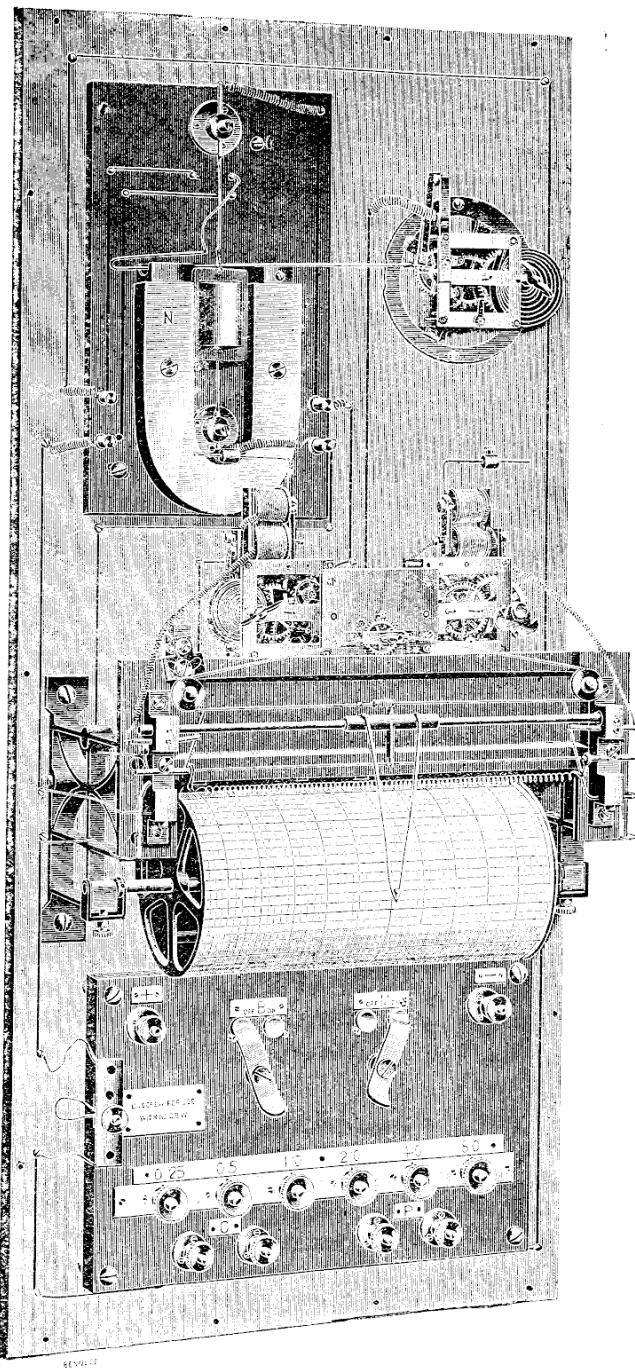


Fig. 33. — Galvanomètre enregistreur à relais du professeur Callendar.

Le galvanomètre, placé à la partie supérieure, est du type Deprez-d'Arsonval à cadre mobile ; il sert de galvanoscope, les mesures s'effectuant par la méthode de réduction à zéro.

Le galvanomètre a pour fonction de déplacer la plume soit vers la droite, soit vers la gauche, suivant le sens de la déviation. La plume s'arrête dès que l'aiguille du galvanomètre cesse d'être déviée.

Le mécanisme de déplacement du chariot, actionné par le galvanomètre, se compose d'un mouvement d'horlogerie analogue à celui des réveille-matin et, par conséquent, d'un prix peu élevé. L'échappement de ce mouvement d'horlogerie est commandé par les armatures d'électro-aimants formant relais et de telle façon que le rouage défile quand l'armature est attirée et s'arrête dès que le courant cesse d'actionner les électro-aimants. Les circuits de ces électro-aimants sont fermés par l'aiguille du galvanomètre.

Ce mouvement d'horlogerie actionne une des roues d'un engrenage différentiel dont le planétaire, ou roue satellite, tourne dans un sens ou dans l'autre suivant que c'est l'un ou l'autre des rouages qui défile. L'axe de la roue satellite porte un pignon qui conduit une roue dentée, dont l'axe porte une poupée formant treuil. Sur ce treuil s'enroule une cordelette qui, passant sur deux galets de renvoi, produit le déplacement du chariot porte-plume et du curseur mobile le long du fil calibré.

Lorsque le relais de gauche attire son armature, le treuil tourne dans un sens et la plume se déplace vers la gauche ; si, au contraire, le relais de droite est actionné, la plume et le curseur vont vers la droite. Enfin, lorsque les relais sont au repos, le chariot s'arrête.

Si, pour une raison quelconque, le chariot tend à dépasser la limite de sa course, le circuit du relais correspondant est coupé automatiquement. La sensibilité des relais se règle par le déplacement convenable de petits contrepoids visibles sur la figure 33.

Ce sont les déviations du cadre mobile du galvanomètre qui actionnent l'un ou l'autre des relais au moyen du dispositif suivant.

Le cadre galvanométrique est muni d'une aiguille le long de laquelle sont fixés deux fils isolés, reliés aux relais par l'intermédiaire de fils très souples et se terminant à l'extrémité de l'aiguille par deux contacts en platine.

Lorsque le galvanomètre ne dévie pas, les pointes en platine sont également écartées d'un tambour en ébonite dont les joues sont garnies de platine. Dans ces conditions, lorsque le galvanomètre dévie dans un sens ou dans l'autre, l'une des pointes vient en contact avec la partie métallique du tambour, fermant ainsi le circuit du relais correspondant.

Afin d'obtenir un contact suffisant, malgré la faiblesse de la pression résultant de faibles déviations, M. Callendar a employé l'artifice suivant : Le tambour à contacts tourne constamment sous l'action d'une mouvement d'horlogerie spécial que représente la figure 33. Un ressort à lames, formant pincettes, frotte sur les parties métalliques du tambour en ébonite et, par suite de cette rotation, entretient les surfaces métalliques dans un grand état de propreté. Pour éviter que les extra-courants de rupture, qui produisent des étincelles toutes les fois que l'aiguille du galvanomètre cesse de toucher les joues du tambour, n'altèrent les surfaces de contact, la rupture du circuit n'est pas complète et celui-ci reste fermé à travers une résistance sans self-induction qui empêche la production d'étincelles. Les relais doivent naturel-

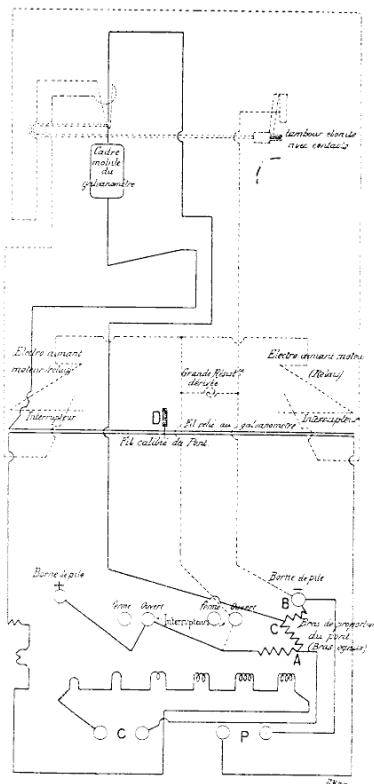


FIG. 31. — Schéma des connexions du galvanomètre Callendar.

lement être réglés de manière que leurs armatures ne soient pas attirées lorsque le courant traverse cette résistance.

Grâce à cette série de dispositions ingénieuses, les relais fonctionnent pour la plus légère déviation du galvanomètre. Le chariot et la plume s'éloignent d'autant plus du centre du tambour enregistreur que l'équilibre du pont est plus détruit.

Sur la figure 34, qui donne les connexions de cet instrument, les circuits du pont sont indiqués en traits pleins et ceux des relais en pointillé. La même pile sert en même temps pour le pont et pour faire fonctionner les relais.

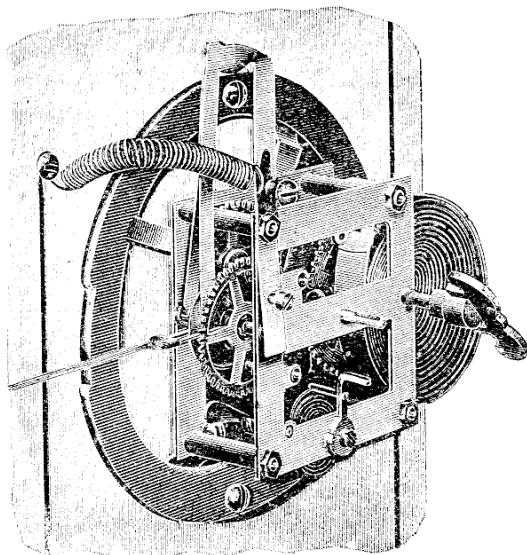


FIG. 33. — Mouvement d'horlogerie du tambour à contacts du galvanomètre enregistreur Callendar.

au-dessus du tambour de l'enregistreur. Ce dernier peut faire un tour en une heure ou en douze heures, suivant que l'on immobilise l'arbre du côté gauche ou celui du côté droit par le serrage de boutons molettés placés sous les chapes qui le supportent, cet arbre étant en deux parties indépendantes.

Le galvanomètre Callendar a été déjà utilisé pour enregistrer la courbe des variations de température d'un four à acier, dans lequel était disposé un pyromètre à fil de platine, dont la résistance variait suivant la température à laquelle il était soumis.

GALVANOMÈTRE THERMIQUE

Galvanomètre à miroir Hartmann et Braun. — Cet instrument (fig. 36) est le seul de ce genre qui ait figuré à l'Exposition.

Comme on le voit sur la figure schématique 37, ce galvanomètre comporte deux fils dilatables AB, CD, parallèles et tendus verticalement. Le courant traverse ces fils, reliés en série ou en parallèle suivant les cas, et la dilatation produite par l'échauffement dû au passage du courant se traduit par le rapprochement des points *a* et *b*, réunis par un fil de soie très fin *acb*. La flèche en *c* est plus grande qu'en *a* et qu'en *b*; l'amplification est encore augmentée par le dispositif suivant : en *c* s'attache un nouveau fil fin qui se fixe, par l'extrémité opposée, dans la jante d'une petite poulie *h*, susceptible de tourner autour de son axe; un petit ressort *r* tend à faire tourner le miroir *m*, solidaire de la poulie *h*, en maintenant tendus le système de fils *cd*, *ab* et les fils dilatables AB et CD. Lorsque ces derniers s'allongent, le ressort *r* entraîne le miroir et, comme la dilatation est considérablement amplifiée, l'instrument est très sensible.

Comme on le voit sur la figure 38, le miroir m est fixé sur une tige verticale qui porte, indépendamment de la poulie h , un disque e en aluminium qui tourne en même temps que le miroir dont il est solidaire. Les bords de ce disque passent entre les branches de l'aimant E et l'on obtient ainsi un amortissement convenable.

Le ressort agissant sur le miroir est, en réalité, remplacé par les fils de suspension gg' et hh' , qui reçoivent une torsion initiale lorsqu'on fait tourner le bouton F que la vis de pression V permet de maintenir dans la position donnée.

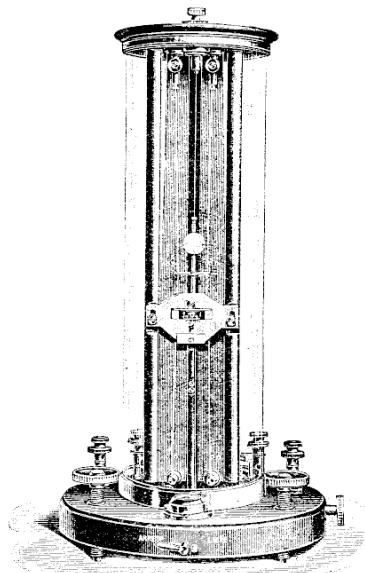


Fig. 36. — Galvanomètre thermique Hartmann et Braun.

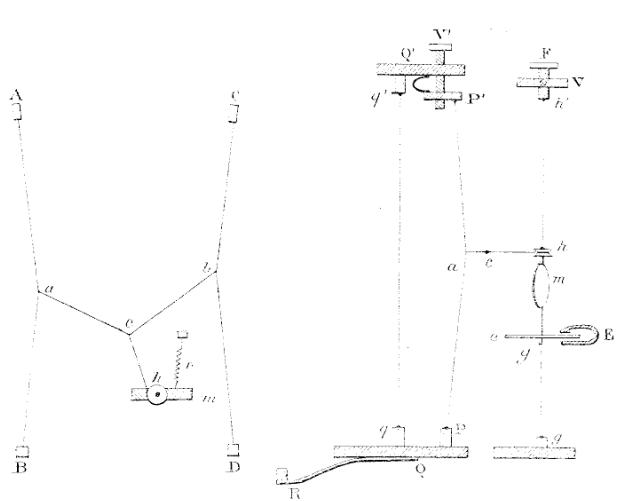


Fig. 37 et 38. — Disposition schématique du galvanomètre thermique Hartmann et Braun.

Chacun des fils dilatables s'attache, d'une part, à un plot P et, d'autre part, à une pièce P' qui sert à donner au fil dilatable une tension convenable par la manœuvre de la vis V . Les plaques Q et Q' sont réunies par un fil qq' , identique aux fils dilatables, mais qui n'est pas traversé par le courant. Ce fil sert à compenser l'action des variations de température sur le système des fils actifs. A cet effet, un ressort R maintient toujours tendu le fil qq' , de telle sorte que la dilatation observée pour les fils traversés par le courant est égale à la différence des dilatations de ces fils et du fil compensateur qq' .

Le métal employé pour constituer les fils dilatables doit avoir une grande résistivité, pratiquement indépendante des variations de température. On peut, par exemple, utiliser des fils de constantan.

GALVANOMÈTRE ÉLECTRO-CAPILLAIRE

Galvanomètre Lippmann. — Cet instrument (fig. 39), improprement appelé électromètre, est un véritable galvanomètre basé sur les variations qu'éprouve la constante capillaire du mercure en présence de l'eau acidulée sulfurique, lorsqu'il existe une différence de potentiel entre les deux liquides.

L'instrument se compose d'un tube de verre vertical A de 70 cm environ de hauteur, se terminant dans le bas par une partie très effilée. Ce tube contient du mercure jusqu'à une hauteur telle que la capillarité équilibre le poids de la colonne de mercure qui, dans ces conditions, se maintient un peu au-dessus de l'extrémité capillaire, prêt à s'écouler. La pointe plonge dans

de l'acide sulfurique étendu, qui est contenu dans le vase B, au fond duquel se trouve une couche de mercure.

Deux fils de platine α et β , soudés respectivement dans le tube A et dans le vase B, permettent de les relier aux deux points dont on veut mesurer la différence de potentiel.

Le pôle négatif doit être en communication avec le tube A et le pôle positif avec le vase B. La polarisation, due au passage du courant dans le sens BA, a pour effet d'augmenter la valeur de la constante capillaire et le mercure remonte alors dans la partie effilée du tube A. Les déplacements du ménisque s'observent à l'aide d'une loupe M.

Pour amener l'instrument au zéro, lorsqu'on veut faire une mesure, il faut d'abord égaliser les potentiels de A et de B, ce qui s'obtient par la mise en court-circuit des bornes α β .

Cet instrument peut être utilisé, comme indicateur, avec les méthodes de réduction à zéro, soit pour fournir des indications directes. Dans ce dernier cas, on prend, comme point de départ, la position occupée

par le ménisque, après que les bornes α et β ont été mises en court-circuit. On relie alors à ces bornes les points dont on veut mesurer la différence de potentiel, différence qui ne doit pas dépasser 0,8 volt, et l'on ramène ensuite le ménisque à sa position initiale en exerçant une pression sur le haut de la colonne mercurelle. A cet effet on comprime, à l'aide de la vis E, la poire en caoutchouc T; un manomètre H fait connaître la valeur de cette pression, valeur de laquelle on déduit la différence de potentiel, exprimée en fractions de volt, à l'aide d'une courbe de graduation établie empiriquement. Au repos, les bornes de ce galvanomètre doivent toujours être reliées en court-circuit.

Ce galvanomètre est construit et exposé par la maison Breguet.

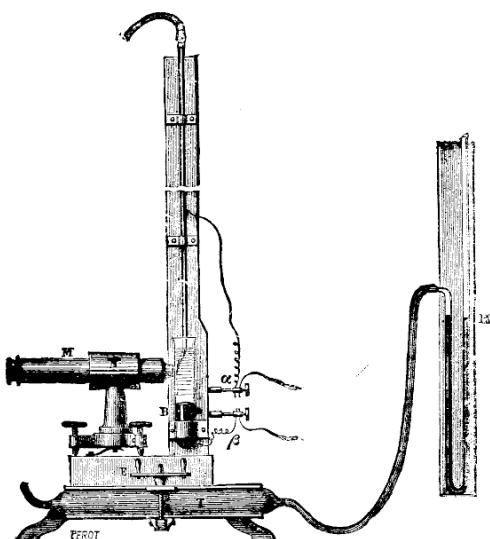


FIG. 39. — Galvanomètre électro-capillaire Lippmann.

ÉLECTRODYNAMOMÈTRES

ÉLECTRODYNAMOMÈTRES DE TORSION

Électrodynamomètres Siemens et Halske. — La Société Siemens et Halske, de Berlin, avait exposé plusieurs modèles d'électrodynamomètres de torsion.

Le modèle le plus connu (fig. 40) comporte un circuit fixe *abcd* (fig. 41) et un circuit mobile ABCD, replié en forme de rectangle et suspendu à un ressort *r*. Les extrémités du

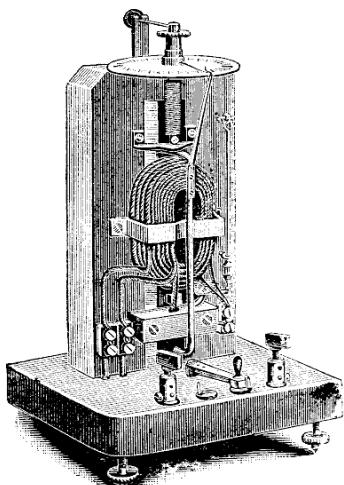


Fig. 40. — Electrodynamomètre de torsion Siemens et Halske.

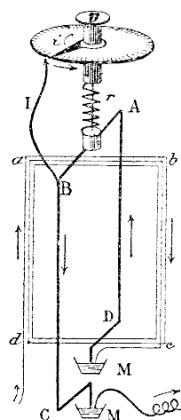


Fig. 41. — Schéma des connexions de l'électrodynamomètre Siemens et Halske.

circuit mobile plongent dans des godets *M*, *M*, remplis de mercure, qui servent à établir les communications nécessaires.

A l'état de repos, le plan du circuit mobile est perpendiculaire à celui du circuit fixe et un index *I*, fixé sur le circuit mobile, se trouve en regard du zéro de la graduation établie sur un cadran horizontal placé à la partie supérieure de l'instrument.

Lorsqu'un courant traverse l'électrodynamomètre en entrant par une des extrémités du circuit fixe et parcourant ensuite le circuit mobile, les parties *ad* et *AD* s'attirent, tandis que les parties *ad* et *BC* se repoussent; dans ces conditions, le circuit mobile est dévié de sa position d'équilibre, le ressort *r* se tord et l'index *I* se déplace dans le sens indiqué par la flèche.

La douille *v*, qui porte le ressort *r*, est également munie d'un index *i* qui, au repos, se trouve en regard du zéro du cadran gradué. Lorsque l'index *I* a été déplacé par suite de la déviation du circuit mobile sous l'action du passage d'un courant, on fait tourner à la

main la douille r dans le sens indiqué par la flèche, afin de tordre le ressort en sens inverse et cela jusqu'à ce que l'index I revienne au zéro. L'index I indique alors sur le cadran gradué la valeur

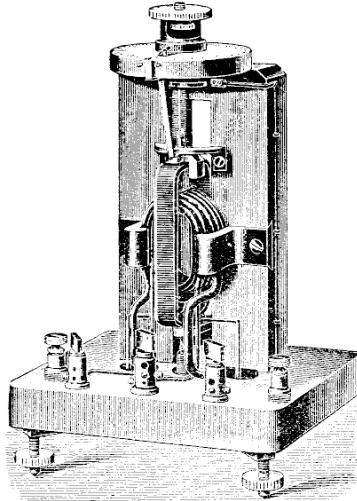


Fig. 42. — Electrodynamomètre Siemens et Halske.

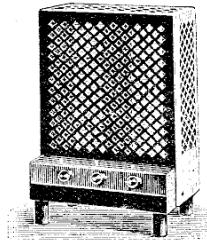


Fig. 43. — Résistance additionnelle pour électrodynamomètre Siemens et Halske.

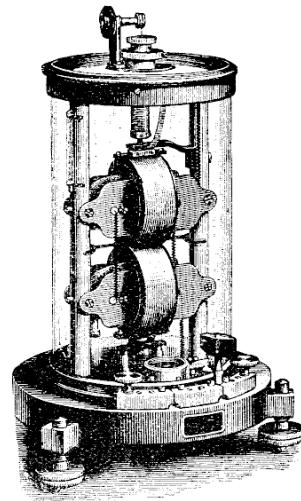


Fig. 44. — Electrodynamomètre astatique Siemens et Halske.

de l'angle de torsion du ressort r , et l'on en déduit l'intensité du courant à l'aide d'une table, fournie avec chaque instrument, table qui donne la valeur en ampères de l'intensité du courant correspondant aux diverses divisions de la graduation, lorsque l'index I a été ramené au zéro.

Généralement, le circuit fixe comporte deux bobines dont le nombre de spires et la section du fil sont différents. On peut ainsi utiliser l'instrument pour la mesure d'intensités très diverses. Le circuit mobile est suspendu à un fil de soie sans torsion, afin que le ressort r ne subisse que des torsions et n'ait pas à supporter le poids du circuit mobile.

Un autre modèle d'electrodynamomètre de torsion est représenté (fig. 42). Il a été construit pour mesurer les intensités de courants continus, alternatifs et polyphasés, depuis 0 jusqu'à 50 ampères et depuis 0 jusqu'à 100 ampères.

En adjointant à l'instrument une résistance additionnelle exempte d'induction et que l'on peut fractionner (fig. 43), on peut utiliser cet électrodynamomètre pour mesurer des différences de potentiel allant jusqu'à 200 volts.

La Société Siemens et Halske a exposé également un autre type d'electrodynamomètre (fig. 44), destiné surtout à être employé comme voltmètre pour tensions continues ou alternatives de formes de courbe quelconques. Il comporte deux bobines fixes et deux bobines mobiles constituant un système relativement astatique par rapport à des champs magnétiques assez éloignés.

Suivant les tensions à mesurer, on intercale dans le circuit des résistances non inductives qu'un commutateur à cheville permet d'insérer facilement. Il se construit trois modèles de ce instrument : l'un permet de mesurer les tensions comprises entre 15 et 90 volts, l'autre de 30 à 190 et le troisième de 120 à 720.

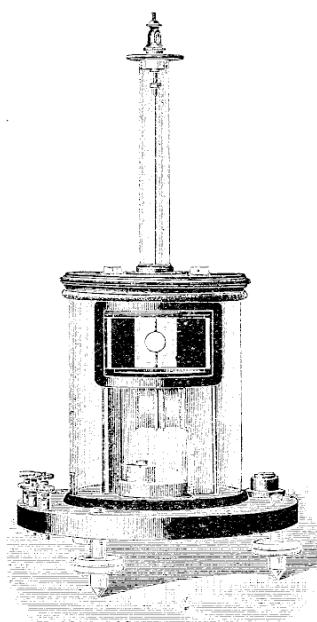


Fig. 45. — Électrodynamomètre à miroir Siemens et Halske.

La même Société a encore exposé un modèle d'électrodynamomètre à miroir que représente la figure 45. Cet instrument ne peut servir qu'à mesurer de faibles intensités du courant. Il comporte deux bobines fixes et une bobine mobile sphérique attachée au fil de suspension qui porte également le miroir.

Il n'entre aucune pièce métallique dans cet instrument; les carcasses des bobines et toutes les pièces, à l'exception des bornes, sont en matière isolante. Les oscillations sont atténées par un amortisseur à air.

Électrodynamomètre Ganz. — Cet instrument, construit et exposé par la maison Ganz de Budapest, est de construction analogue à celle de l'électrodynamomètre Siemens. Il permet de mesurer l'intensité des courants continus et des courants alternatifs de toute fréquence jusqu'à 30 et jusqu'à 200 ampères.

Le courant traverse les bobines fixes et le circuit mobile montés en série et il développe un couple proportionnel au carré de son intensité. Le couple résistant étant proportionnel à la torsion du ressort, l'intensité mesurée est égale à $C\sqrt{\theta}$, C étant une constante variable d'un instrument à l'autre avec le ressort utilisé et θ étant l'angle de torsion.

Un système de commutateur à fiches permet de retirer l'instrument du circuit ou de changer de bobine fixe sans interrompre le courant.

Électrodynamomètre J. Carpentier. — L'électrodynamomètre J. Carpentier (fig. 46) est basé sur le même principe que celui de Siemens, mais il en diffère par quelques détails de construction.

Le ressort à boudin et le fil de suspension en soie sont remplacés par un fil métallique de torsion qui sert en même temps de conducteur pour amener le courant à la bobine mobile.

Cet instrument, destiné à mesurer des courants d'assez grande intensité, a deux bobines fixes, formées d'un ruban de cuivre très épais et faisant un certain nombre de tours. La bobine mobile, placée à l'intérieur des bobines fixes, a son plan perpendiculaire à celui de ces dernières, auxquelles elle est reliée en dérivation; elle est munie d'une aiguille d'aluminium dont la course est limitée par deux butées. Lorsqu'un courant traverse l'instrument, l'aiguille est déviée et, pour obtenir l'équilibre, on tourne le bouton supérieur jusqu'à ce que l'aiguille indicatrice soit ramenée à un point de repère placé entre les deux butées. Le bouton porte un index qui permet de lire l'angle de torsion sur un cadran. Une table, fournie avec l'instrument, fait connaître le nombre d'ampères correspondant aux divisions lues sur le cadran.

Électrodynamomètre Hartmann et Braun. — Cet instrument (fig. 47) diffère sensiblement des électrodynamomètres qui viennent d'être décrits. Il se compose d'une bobine fixe, sorte de solénoïde plat dont l'axe est incliné sur la verticale, et de deux bobines mobiles fixées aux extrémités d'un bras horizontal et reliées en dérivation avec la bobine fixe. Cet équipage mobile est suspendu à l'aide d'un ressort en métal non magnétique et d'un fil métallique qui servent en même temps de conducteur au courant; l'ensemble des deux bobines et du bras qui les porte peut tourner autour d'un axe vertical passant par le centre de gravité.

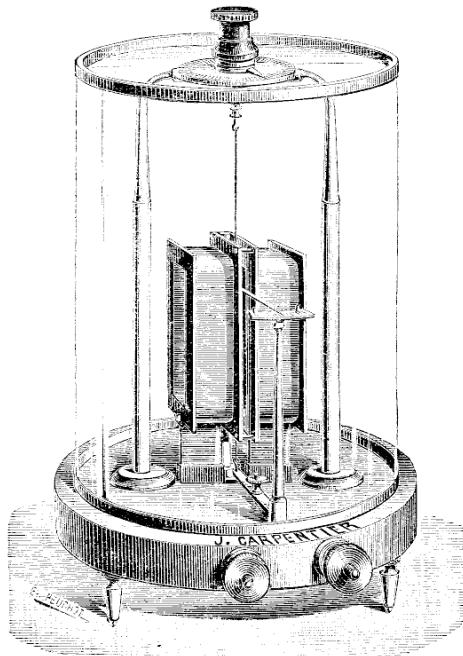


Fig. 46. — Électrodynamomètre Carpentier.

Une ailette en aluminium, fixée à la partie inférieure de l'axe et enfermée dans une boîte cylindrique, assure l'amortissement.

Les bobines de l'équipage mobile sont reliées entre elles de manière à constituer un système astatique et à se rapprocher de la bobine fixe lorsqu'elles sont traversées par le courant. Grâce à cette disposition, on peut obtenir une échelle assez proportionnelle; en faisant varier les positions relatives des bobines, on peut aussi obtenir une échelle quelconque.

Cet instrument est à lecture directe.

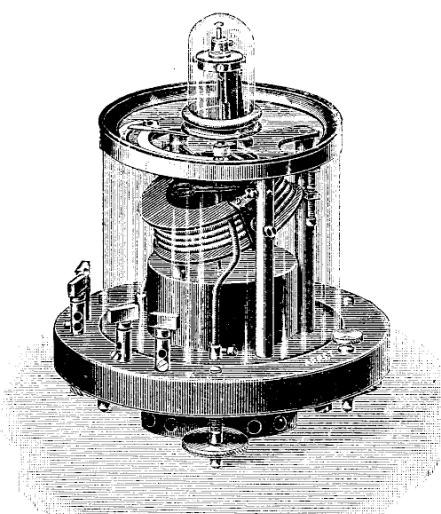


Fig. 47. — Électrodynamomètre-Hartmann et Braun.

Celui-ci ne comporte naturellement aucune pièce en métal magnétique; les couteaux du fléau de la balance et les plans sur lesquels ils reposent sont en agate. Le cuivre du fléau est du métal pur exempt de fer.

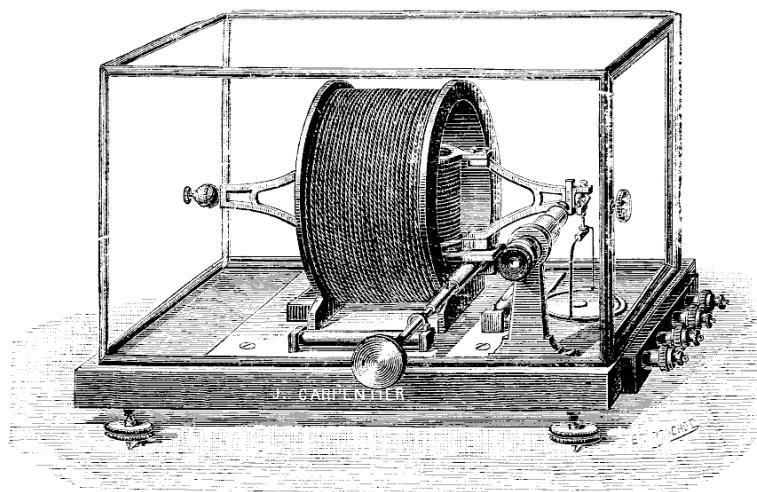


Fig. 48. — Ampère-étalon Pellat.

Avec cet instrument, on peut mesurer des intensités dont la valeur est comprise entre 0,2 et 0,3 ampère.

L'intensité cherchée est donnée par la formule suivante : $I = C \sqrt{gM}$, en unités C. G. S. (1 unité C. G. S. d'intensité = 10 ampères).

Pour éliminer l'action du champ magnétique terrestre, on inverse le sens du courant *dans la bobine fixe seule* et, pour que le fléau s'incline dans le même sens dans les deux cas, on met

un poids de 5 grammes dans le plateau avant de régler le contrepoids. On diminue ou on augmente ensuite ce poids, suivant le sens du courant, de façon à ramener toujours l'équilibre.

Dans cette formule, C est la constante d'étalonnage, M est la masse des poids mis dans le plateau et exprimée en grammes, et g l'accélération due à la pesanteur.

Avec l'ampère-étalon Pellat, un courant de 0,3 ampère est équilibré par un poids de 1,5 gramme environ. On apprécie donc la valeur de l'intensité à $\frac{1}{40000}$.

L'ampère-étalon Pellat est construit et exposé par M. J. Carpentier.

Electrodynamomètres-balances lord Kelvin. — Ces instruments sont construits et exposés par M. James White, de Glasgow.

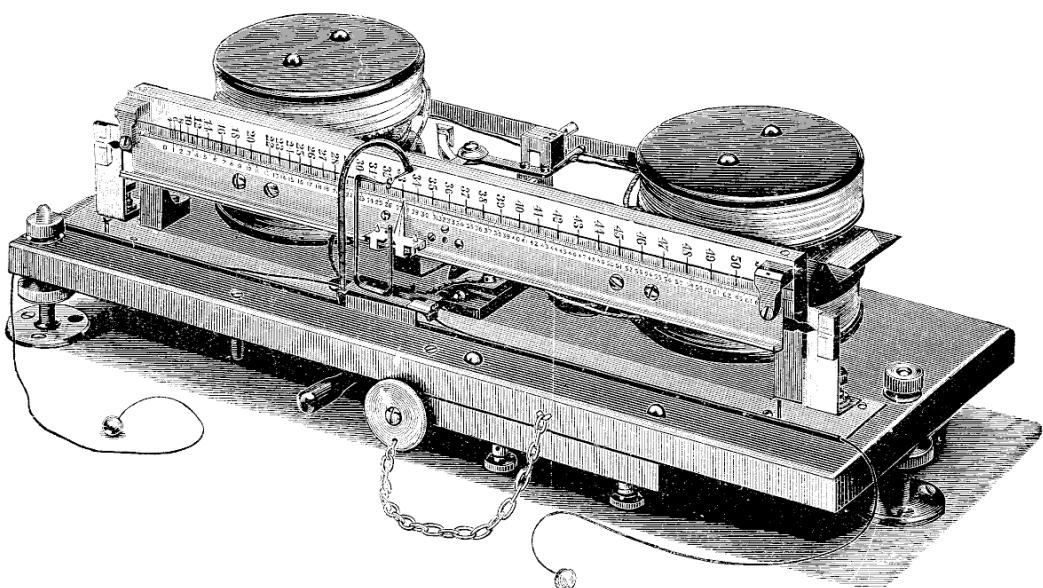


Fig. 49. — Balance centiampère.

Dans ces électrodynamomètres, le courant circule dans un ensemble de bobines, fixes et mobiles, et y développe des flux dont les actions réciproques produisent un couple électrodynamique que l'on équilibre par le poids de masses étalonées; en d'autres termes, l'effort électrodynamique est mesuré par l'action de la pesanteur sur une masse donnée.

L'electrodynamomètre-balance (fig. 49) se compose essentiellement de deux paires de bobines fixes, horizontales et parallèles, FF, FF (fig. 50), entre lesquelles peuvent osciller deux bobines mobiles M, M, fixées horizontalement à chacune des extrémités d'un fléau de balance oscillant autour de son axe.

Le courant, dont le sens est indiqué par des flèches sur la figure 50, traverse en sens contraire les deux bobines fixes de droite, puis se partage en deux parties égales entre les bobines mobiles M, M, pour circuler finalement dans les bobines fixes de gauche. Le sens du courant est inversé dans chacune des bobines M, M, afin d'annuler l'action exercée par le magnétisme terrestre et de rendre ainsi le système astatique.

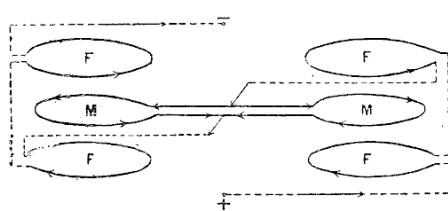


Fig. 50. — Schéma des bobines de l'électrodynamomètre-balance.

Par suite du sens dans lequel circule le courant dans les diverses bobines de l'instrument, la bobine mobile de droite est repoussée par la bobine fixe inférieure et attirée par la bobine fixe supérieure; au contraire, la bobine mobile de gauche est attirée par la bobine fixe inférieure et repoussée par la bobine fixe supérieure. Les actions ainsi exercées sur les bobines M et M' s'ajoutent donc et l'ensemble constitue un électrodynamomètre double.

Dans un électrodynamomètre ordinaire, le couple est proportionnel au carré de l'intensité du courant; dans l'électrodynamomètre-balance, ce couple est proportionnel au double du carré de l'intensité.

Sous l'action des flux engendrés par le passage du courant dans les bobines de l'instrument, l'extrémité de droite du fléau portant les bobines mobiles tend à se relever, tandis que l'extrémité de gauche tend à s'abaisser. Afin de pouvoir mesurer le couple électrodynamique produit, un poids p est fixé à l'extrémité de droite du fléau et à une distance déterminée de l'axe de suspension. Un autre poids p' , égal au poids p , est placé à l'extrémité de gauche du fléau; ce poids est mobile sur une règle divisée fixée au fléau. Lorsque le poids mobile se trouve placé à la même distance de l'axe de suspension que le poids fixe, le fléau reste en équilibre, à la condition, toutefois, qu'aucun courant ne passe dans les bobines. Lorsqu'un courant, au contraire, les traverse, l'équilibre est rompu par suite des actions électrodynamiques qui s'exercent entre elles et, pour le rétablir, il faut déplacer le poids mobile vers la droite, à une distance d . Cela revient à augmenter l'action du poids fixe p d'une quantité qui le rende égal à $p'd$; on mesure donc le couple électrodynamique par la longueur du déplacement d qu'il faut faire subir au poids mobile, glissant sur la règle divisée, pour rétablir l'horizontalité du fléau.

En désignant par k une constante de construction, variant avec la valeur du poids p , et par i l'intensité du courant à mesurer, on a :

$$i = k 2 \sqrt{d}.$$

Les bobines de l'électrodynamomètre-balance sont naturellement dépourvues de fer et constituées par du fil de cuivre pur roulé sur des carcasses en carton laqué. Une table, jointe à l'instrument, fait connaître les doubles racines carrées des nombres gravés sur la règle divisée fixée sous le fléau.

Au point de vue des dispositions de construction, les balances lord Kelvin présentent des particularités très ingénieuses. Il suffira, pour les faire connaître, de décrire un des modèles de ces instruments, la balance centiampère (fig. 49).

Pour faire arriver le courant à des bobines mobiles, on a le plus souvent recours au système

de contacts plongeant dans du mercure; ce système présente des inconvénients et n'est guère applicable dans le cas où il s'agit d'effectuer des mesures précises. Lord Kelvin a évité cette difficulté en faisant arriver le courant aux bobines mobiles par l'intermédiaire d'une série de fils très fins, placés à côté les uns des autres

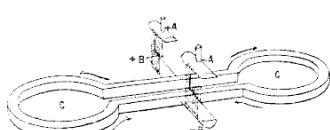


Fig. 31. — Détails de la suspension de l'électrodynamomètre-balance.

et soudés par leurs extrémités aux pièces fixes + B, - B (fig. 51), d'une part, et aux pièces mobiles + A, - A, d'autre part. Ces fils sont également tendus et servent de suspension au fléau, remplaçant ainsi les couteaux habituellement employés dans les balances ordinaires. Ces fils fins peuvent supporter des densités de courant très élevées et leur nombre varie naturellement suivant l'intensité maximum du courant qui doit traverser l'instrument. Ainsi, dans la balance du type kiloampère (fig. 54), qui permet de mesurer un courant maximum de 2 300 ampères, chaque suspension est formée de fils de 0.03 mm de diamètre qui, malgré qu'ils soient très rapprochés, occupent néanmoins, sur les pièces AA et BB, des longueurs de 12 à 13 cm. La raideur de cette suspension est négligeable relativement à la valeur des couples à mesurer, grâce à la longueur convenable donnée à cette sorte de ruban souple.

Le poids fixe p , placé à l'extrême droite du fléau et devant occuper une position parfaitement déterminée à une distance constante de l'axe de suspension, affecte la forme d'un cylindre traversé par une longue goupille. Il se pose à plat dans une gouttière, en forme de V, remplaçant le plateau de la balance. Cette gouttière est percée d'un trou dans lequel s'engage la goupille dont est muni le poids. On évite ainsi toute incertitude sur la manière de placer ce poids sur son support.

La masse mobile, qui glisse sur la règle divisée du fléau, se compose d'un curseur ayant un poids déterminé et qui est guidé par une rainure pratiquée dans la règle. Sur ce curseur se place un poids supplémentaire qu'un dispositif, consistant en pointes, oblige à placer toujours de la même manière.

Le socle de la balance est en ardoise vernie; il repose sur trois vis calantes qui permettent de le placer dans une position parfaitement horizontale en se guidant sur les indications d'un niveau à bulle d'air.

Une cage vitrée recouvre l'instrument. Afin de pouvoir manœuvrer le curseur du poids mobile sans qu'il soit nécessaire d'enlever cette cage, un chariot est muni, à droite et à gauche, de cordonnets en soie qui sortent de la cage. La figure 32 représente cette disposition.

Lorsqu'on tire un des cordonnets, la potence fixée sur le chariot entraîne avec elle une tige recourbée en forme d'U, dont la branche la plus courte pousse le curseur. Dès que l'on cesse de tirer sur le cordonnet, la tige en U reprend la position verticale et n'appuie plus sur le curseur, qui reste ainsi parfaitement libre.

Un index, placé sur le curseur, indique exactement la position occupée par le poids mobile sur la règle divisée. Lorsqu'on veut obtenir de très faibles déplacements du curseur, on tire sur l'un des cordonnets, tout en retenant l'autre; l'élasticité de la soie permet alors d'imprimer au système un très petit déplacement. Les lectures se font à l'aide d'une loupe que l'on peut poser sur la cage vitrée.

Pour immobiliser le fléau, il suffit de tourner le bouton moleté qui actionne le mécanisme de relevage de ce fléau. Le bouton est lui-même immobilisé au moyen d'une goupille fixée à une chaînette accrochée sur le socle.

A gauche du bouton moleté, on aperçoit, sur la figure 49, une petite manette qui sert à régler l'horizontalité du fléau au commencement d'une mesure. A cet effet, le milieu du fléau est muni d'une aiguille mobile articulée; en écartant plus ou moins la pointe de l'aiguille du point de suspension du fléau, on modifie la position du centre de gravité du système mobile et on fait incliner le fléau du côté vers lequel a été dirigée la pointe de l'aiguille. La manette commande une fourchette entre les dents de laquelle est engagée la pointe de l'aiguille.

Pour se servir d'un électrodynamomètre-balance, on commence par placer un poids fixe convenable dans la gouttière que porte l'extrême droite du fléau, puis le poids correspondant sur le curseur dont on amène l'index en regard du zéro de la règle graduée.

Le fléau pouvant osciller librement, on manœuvre la fourchette qui actionne l'aiguille de réglage jusqu'à ce que le fléau ait pris une position bien horizontale, ce qu'il est facile de constater par la position de deux index, fixés chacun à une des extrémités de la règle divisée et qui se meuvent en regard de traits de repère, gravés sur une petite règle verticale fixée sur le socle. Lorsque la balance est ainsi au zéro, on agit légèrement sur la manette, afin que la fourchette qu'elle commande ne touche plus à l'aiguille de réglage. Naturellement, les diverses opérations qui viennent d'être décrites doivent être effectuées alors qu'aucun courant ne passe dans l'instrument.

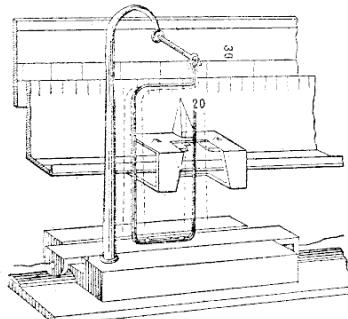


Fig. 32. — Dispositif de manœuvre du poids mobile de l'électrodynamomètre-balance.

Tout étant ainsi disposé, on fait passer le courant à mesurer dans la balance en l'amenant aux bornes placées sous le socle de l'instrument (fig. 49). Aussitôt, l'équilibre est détruit, et on ramène le fléau dans la position horizontale, en déplaçant vers la droite et de la quantité voulue le curseur mobile. Il n'y a plus qu'à lire la division devant laquelle se trouve l'index, à chercher ensuite dans la table le double de la racine carrée correspondant au nombre lu et, enfin, à multiplier le résultat par le coefficient affecté à la paire de poids que l'on a employée. Ce coefficient est indiqué dans les différentes cases de la boîte destinée à renfermer les poids.

Lorsqu'on veut se dispenser d'avoir recours à la table, on lit sur une règle fixe placée derrière la règle mobile la double racine carrée du nombre marqué par l'index sur cette dernière. Ce procédé est plus rapide, mais aussi moins exact, car il est facile de commettre une erreur de parallaxe en estimant à quelle division de la règle fixe correspond la division indiquée sur la règle mobile par l'index du chariot.

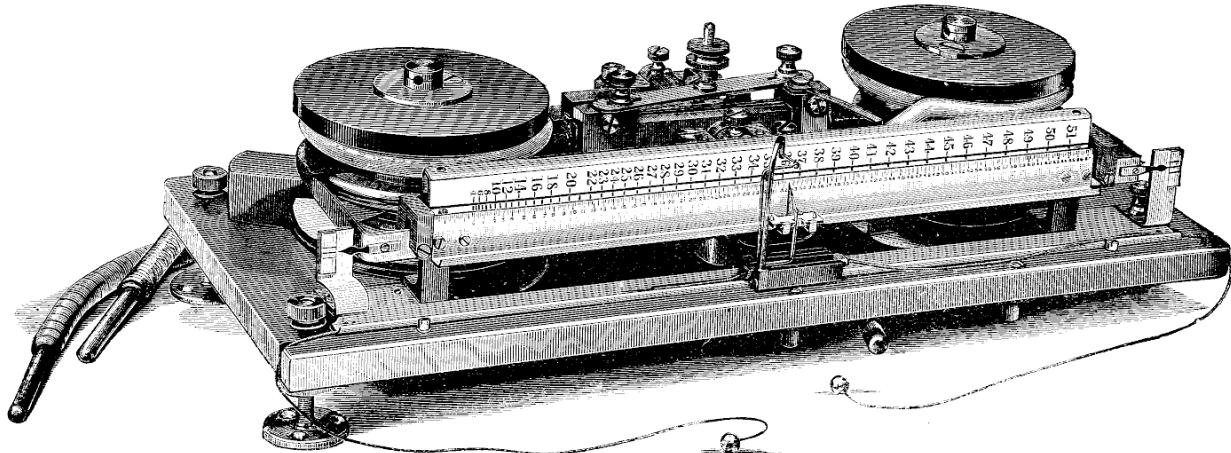


Fig. 53. — Balance décaampère.

Voici les données relatives à la série de poids de la balance centiampère.

Poids mobiles.		Poids fixes.	
4 ^{re} paire de poids, curseur seul	= 0,8333 gr	N ^o 1	= 0,8333 gr
2 ^e —	curseur plus poids n ^o 2 de 3,330 gr	N ^o 2	= 4,1663 gr
3 ^e —	curseur plus poids n ^o 3 de 13,332 gr	N ^o 3	= 14,1663 gr
4 ^e —	curseur plus poids n ^o 4 de 53,328 gr	N ^o 4	= 54,1613 gr

Les doubles racines carrées des nombres lus sur la règle fixe divisée ou prises dans la table doivent être multipliées par :

0,0025	lorsqu'on utilise la paire de poids n ^o 1		
0,0050	—	—	2
0,0100	—	—	3
0,0200	—	—	4

ce qui revient à diviser les doubles racines carrées par :

400	lorsqu'on utilise la paire de poids n ^o 1		
200	—	—	2
100	—	—	3
50	—	—	4

On utilise l'une des paires de poids suivant l'intensité du courant à mesurer.

Avec la paire n^o 1 on peut mesurer de 0 à 0,125 ampère.

Avec la paire n° 2, de 0 à 0,250 ampère.

Avec la paire n° 3, de 0 à 0,500 ampère.

Avec la paire n° 4, de 0 à 1 ampère.

La résistance totale des bobines est de 55 ohms à la température de 17° centigrades.

La balance centiampère comme, du reste, les autres modèles, peut supporter, sans échauffement sensible et d'une façon continue, un courant ayant une intensité égale à 75 0/0 de l'intensité maximum que l'instrument peut mesurer.

Il se construit cinq modèles d'électrodynamomètres lord Kelvin :

1^o Balance centiampère (*fig. 49*), pouvant mesurer de 1 à 100 centiampères ;

2^o Balance déciampère, pouvant mesurer de 1 à 100 déciampères ;

3^o Balance décaampère (*fig. 53*), pouvant mesurer de 1 à 100 ampères ;

4^o Balance hectoampère, pouvant mesurer de 6 à 600 ampères ;

5^o Balance kiloampère (*fig. 54*), pouvant mesurer de 25 à 2 500 ampères.

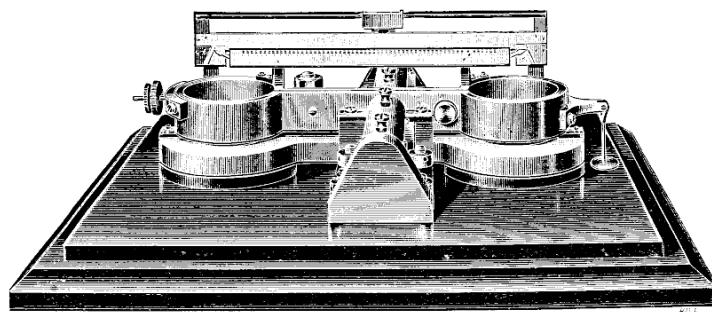


FIG. 54. — Balance kiloampère.

Dans ces divers modèles de balances, l'emploi des courants alternatifs donnerait lieu à la production de courants de Foucault qui troubleraient les lectures, sauf, toutefois, dans la balance centiampère. Pour la mesure des courants alternatifs, les bobines sont constituées par des fils isolés séparément et enroulés en parallèle. On évite ainsi les perturbations qu'entraîne l'emploi de conducteurs massifs.

La balance kiloampère ne se prête qu'à la mesure des courants continus.

III

ÉLECTROMÈTRES

ÉLECTROMÈTRE ABSOLU

Électromètre Bichat et Blondlot. — Cet instrument (fig. 53), construit et exposé par M. E. Ducretet, se compose de deux cylindres métalliques A et B, disposés concentriquement.

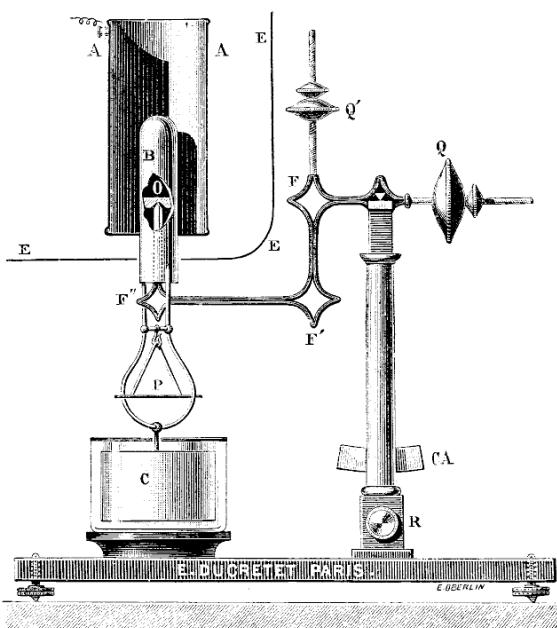


FIG. 53. — Électromètre absolu Bichat et Blondlot.

Le cylindre A est fixe et le cylindre mobile B est supporté en O par un fléau de balance QFF'F'' que l'on équilibre au moyen d'un contrepoids Q.

À sa partie inférieure, le cylindre B est muni d'un support auquel s'accroche un plateau P destiné à recevoir des poids marqués et un amortisseur à air C.

Sous l'action d'une charge électrique, le cylindre B est attiré à l'intérieur du cylindre A. On rétablit alors l'équilibre du fléau en plaçant des poids convenables dans le plateau P.

Les tensions sont mesurées par la valeur des poids nécessaires pour rétablir l'équilibre et l'instrument est gradué d'après ses dimensions géométriques.

Lorsque la tension est suffisante pour qu'il se produise une étincelle entre les deux cylindres, on ne peut effectuer la mesure. La distance explosive est de 22 mm et correspond à une tension de 106 unités électrostatiques.

ÉLECTROMÈTRES A GRADUATION EMPIRIQUE

Électromètre portatif lord Kelvin. — Cet instrument (fig. 36) est une simplification de l'électromètre absolu de lord Kelvin.

Il se compose d'un vase en verre au fond duquel se trouve une jauge ou armature p de surface déterminée d'un condensateur, dont l'autre armature est constituée par des feuilles d'étain collées sur la surface extérieure du vase. D'autres feuilles d'étain, collées sur la surface intérieure, sont reliées à la jauge p , qui peut être attirée par un plateau A qu'une vis micrométrique C permet d'éloigner plus ou moins. Les feuilles d'étain, intérieures et extérieures, sont respectivement mises en communication avec les pôles d'une pile de charge. Pour comparer des différences de potentiel, on charge successivement le plateau A et on le rapproche ou on l'éloigne de la jauge p , jusqu'à ce que l'aiguille indicatrice, dont est munie cette dernière, se trouve au zéro, ce que l'on constate en regardant à travers la loupe L .

Le rapport des distances du plateau A à la jauge p fait connaître la différence de potentiel.

La sensibilité de cet instrument varie suivant la force électromotrice de la pile de charge.

Pour maintenir une atmosphère parfaitement sèche à l'intérieur du vase, on place dans une coupe annulaire un morceau de pierre ponce P , imbibée d'acide sulfurique concentré.

Électromètres Mascart. — L'électromètre symétrique Mascart, construit et exposé par M. J. Carpentier, se compose (fig. 37) d'une boîte cylindrique creuse fendue suivant deux diamètres perpendiculaires et formant quatre secteurs fixes et creux situés dans un même plan. Le secteur mobile, en forme de 8, se déplace à l'intérieur des secteurs fixes ; il est fixé à une suspension bifilaire en fil de cocon et se prolonge, vers le bas, par un fil de platine, plongeant dans un vase contenant de l'acide sulfurique pur et concentré, qui sert à relier le secteur mobile aux sources d'électricité à mesurer. Un petit miroir, fixé sur le fil de platine, permet de lire la déviation sur une échelle graduée.

Les secteurs fixes sont reliés deux à deux en diagonale à l'aide de fils isolés. Chaque paire est, en outre, reliée respectivement à l'un des pôles d'une pile à eau dont l'élément situé au milieu de la batterie est en communication avec la terre. Ces paires de secteurs sont ainsi chargées à des potentiels égaux, mais de signes contraires.

Le secteur mobile est mis en communication successivement avec le pôle positif du générateur à étudier, puis avec le pôle négatif ; on note les déviations obtenues, déviations qui sont de sens inverse. Ces déviations sont proportionnelles au potentiel du secteur mobile, c'est-à-dire du générateur à étudier.

On peut employer l'électromètre Mascart d'une manière différente en reliant une paire de secteurs fixes à la terre, l'autre étant en communication avec le secteur mobile et le générateur à étudier. Dans ce cas, les déviations sont proportionnelles aux carrés des potentiels et sont toujours de même sens.

Cet instrument n'est pas apériodique ; il est très sensible, mais son installation et son maniement exigent beaucoup de soins.

M. E. Ducretet construit un modèle d'électromètre Mascart à quadrants que représente la figure 38.

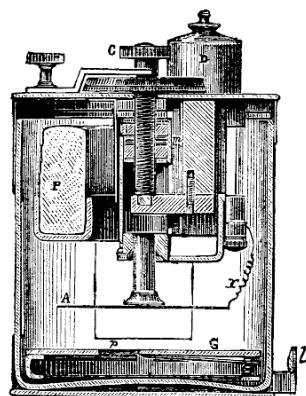


FIG. 36. — Électromètre portatif lord Kelvin.

La suspension bifilaire, ordinairement en fils de cocon, est ici en fils métalliques très fins. La cuvette R a deux compartiments concentriques : celui du milieu contient de l'huile dans laquelle

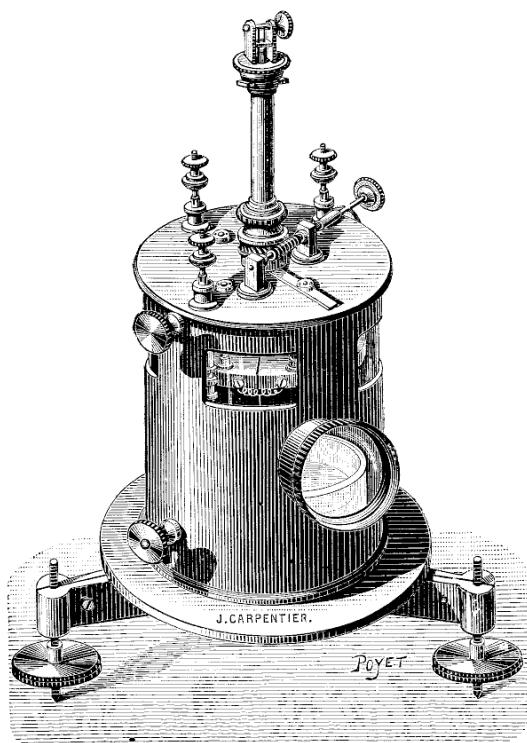


FIG. 37. — Électromètre Mascart, modèle J. Carpentier.

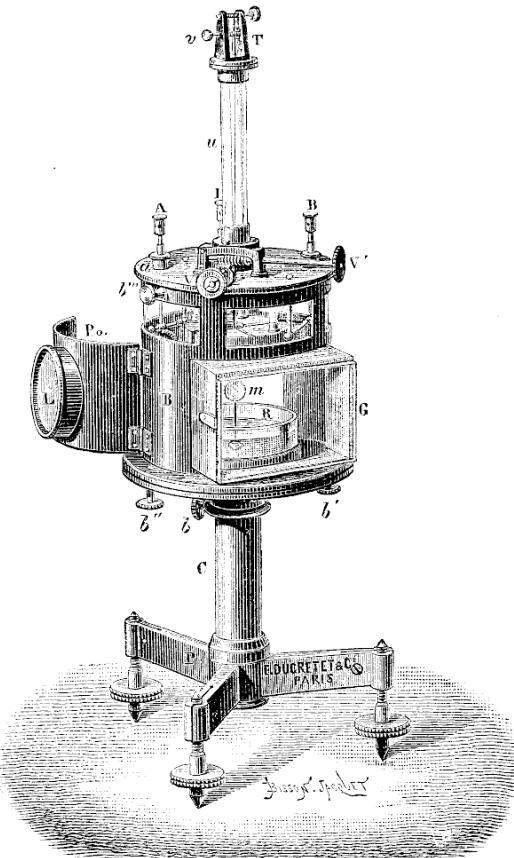


FIG. 38. — Électromètre Mascart, modèle Ducretet.

plonge l'amortisseur de l'équipage mobile ; le compartiment extérieur renferme de l'acide sulfurique concentré destiné à absorber l'humidité.

Électromètre astatique Blondlot et Curie. — Cet instrument (fig. 39) est une transformation de l'électromètre à quadrants de lord Kelvin. L'armature mobile est constituée par quatre secteurs métalliques fixés dans un même plan sur un support en ébonite Ai . Les armatures fixes, au nombre de deux, P_1 et P_2 , sont également formées de quatre secteurs ; elles sont disposées de manière à pouvoir être éloignées ou rapprochées de l'armature mobile.

Les armatures fixes et mobile sont chacune constituées par un disque d'ébonite qui supporte les secteurs formés d'une mince couche d'argent métallique.

L'angle que forment les diamètres suivant lesquels sont coupés les secteurs de l'armature et ceux des armatures fixes est voisin de 45° et les secteurs opposés par le sommet sont reliés électriquement.

L'armature mobile est suspendue par des fils métalliques très fins f, f' , l'un en haut, l'autre en bas, qui servent à produire le couple de torsion et à relier les points entre lesquels existe une différence de potentiel aux deux paires de secteurs de cette armature.

Quatre bornes A, B, C, D, reliées respectivement aux paires de secteurs des armatures fixes et

de l'armature mobile, permettent de les charger. Sous l'action des charges appliquées à ces paires de secteurs, il se produit une déviation que l'on apprécie par la méthode objective, grâce au miroir *m* muni d'ailettes servant d'amortisseur.

Cet instrument peut aussi être utilisé comme wattmètre électrostatique en effectuant les connexions qui seront indiquées dans le chapitre consacré aux wattmètres.

Électromètre apériodique J. Carpentier. — Cet électromètre (fig. 60) a une armature mobile constituée par un cadre rectangulaire en aluminium dont les parties verticales sont cylindriques et exactement de révolution autour de l'axe. L'armature fixe est constituée par un cylindre de fer doux, divisé en quatre secteurs, muni d'une enveloppe extérieure en laiton, également divisée, qui forme avec les secteurs en fer correspondants deux paires de quadrants; chaque secteur comprend donc une partie en fer et son enveloppe en laiton. Les secteurs intérieurs en fer doux servent en même temps de noyau pour fermer le circuit magnétique d'un système d'aimants en U entre les pôles duquel se trouve placé le cadre en aluminium.

Comme dans l'électromètre Mascart, les secteurs fixes diamétralement opposés sont reliés entre eux, mais sont soigneusement isolés des secteurs adjacents, ainsi que de l'armature mobile.

Cette armature est suspendue entre deux fils métalliques placés dans le prolongement l'un de l'autre; le fil supérieur porte un miroir servant à effacer les lectures par la méthode objective. Ces fils de suspension produisent le couple résistant.

Le socle de l'instrument est en ébonite et porte trois bornes: la borne du milieu est reliée à l'armature mobile par l'intermédiaire des fils métalliques de suspension; les deux autres sont respectivement en communication avec les deux paires de secteurs de l'armature fixe.

Sous l'influence d'une charge, le cadre mobile est dévié et, comme on le relie généralement à l'une des paires de secteurs fixes, les déviations sont proportionnelles aux carrés des charges, c'est-à-dire aux carrés des forces électromotrices ou des différences de potentiel à mesurer.

Le système d'aimants utilisé dans cet électromètre a pour objet d'amortir les oscillations du cadre mobile, grâce aux courants induits qui se produisent pendant son déplacement. En pratique, l'apériodicité de l'instrument est aussi grande que celle qui est obtenue dans les galvanomètres Deprez-d'Arsonval.

Cet instrument peut donner une déviation de 250 mm pour une différence de potentiel de 75 volts. En employant la méthode hétérostatique avec une pile de charge de 100 éléments, on peut obtenir une déviation de 10 mm par volt.

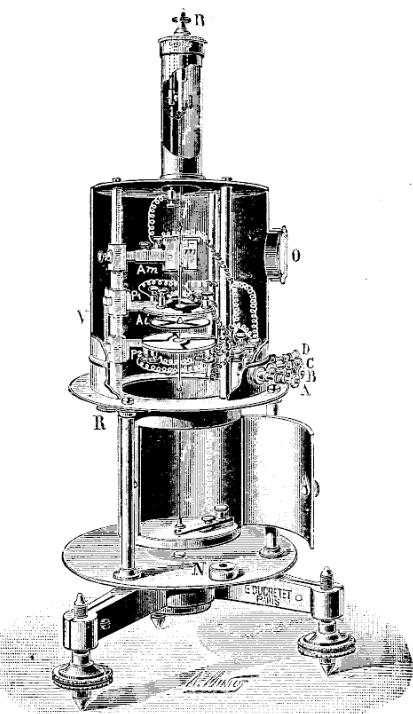


FIG. 59. — Électromètre Blondlot et Carre.

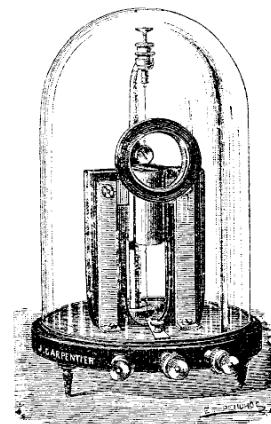


FIG. 60. — Électromètre apériodique Carpentier.

Électromètre Hallwachs. — Cet électromètre à quadrants, construit et exposé par la maison Stieberitz, de Dresde, est caractérisé par une suspension métallique de l'armature mobile que l'on peut charger directement, évitant ainsi une connexion par l'intermédiaire d'un liquide, dispositif pouvant causer des erreurs par suite de la capillarité.

L'armature mobile est suspendue à un fil de platine de 0,03 mm de diamètre, préparé spécialement pour conserver un coefficient d'élasticité parfaitement constant.

Les oscillations sont rendues presque apériodiques par l'action d'un amortisseur à air. Avec la méthode idioscopique, on obtient une déviation de 10 mm par volt sur une échelle placée à 2 m du miroir; avec la méthode hétéroscopique, on peut obtenir une déviation de 150 mm par volt.

Électromètre Nernst et Dolezalek. — Cet instrument, construit par M. Bartels, de Goettingue et exposé par l'Institut Royal physico-chimique de la même ville, se compose de deux électromètres à quadrants superposés l'un à l'autre et dont les armatures mobiles, reliées invariablement entre elles, sont suspendues à une fibre de quartz très fine.

La charge des armatures mobiles est assurée d'une façon permanente par une pile sèche de Dolezalek et Nernst (étain et peroxyde de plomb), renfermée dans un tube léger qui sert à relier les deux armatures et qui a une force électromotrice de plusieurs centaines de volts.

Les deux séries de quadrants des armatures fixes étant reliées aux points entre lesquels existe la différence de potentiel à mesurer de façon que les charges électrostatiques s'ajoutent, on obtient, sans pile de charge extérieure et sans recharger, un électromètre très sensible, permettant de mesurer 10^{-5} volts.

Électromètre Bornhauser. — Cet instrument, construit par M. Bornhauser, de Charlottenbourg, d'après le principe de l'électromètre de V. Bjerknes, était exposé par l'Institut physico-technique Impérial de Charlottenbourg. Cet électromètre, avec lecture au miroir, est utilisé pour mesurer des tensions alternatives de plusieurs milliers de volts, après avoir été gradué au moyen d'une batterie à haute tension.

Électromètre Hoor. — Cet électromètre à quadrants, du genre lord Kelvin, a été construit et exposé par la maison Ganz, de Budapest. L'armature mobile, en forme de 8, est en aluminium; elle est suspendue par un fil de platine. Les quatre quadrants de l'armature fixe sont placés dans un plan au-dessous de l'armature mobile.

AMPÈREMÈTRES ET VOLTMÈTRES

INSTRUMENTS ÉLECTRODYNAMIQUES

Ampèremètre et voltmètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft. — Ces instruments, spécialement établis pour être utilisés avec les courants alternatifs, doivent remplir les mêmes conditions de sensibilité, de précision et d'amortissement que les instruments employés avec le courant continu et, de plus, donner des indications qui soient indépendantes de la forme de la courbe des courants et de leur fréquence.

Les ampèremètres et les voltmètres électrodynamiques construits et exposés par l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft de Berlin remplissent toutes ces conditions dans les limites industrielles que permettent les courants alternatifs.

Le défaut d'apéridicité étant le principal obstacle à l'emploi de ces instruments, les constructeurs ont pu surmonter cette difficulté en utilisant un amortisseur électromagnétique.

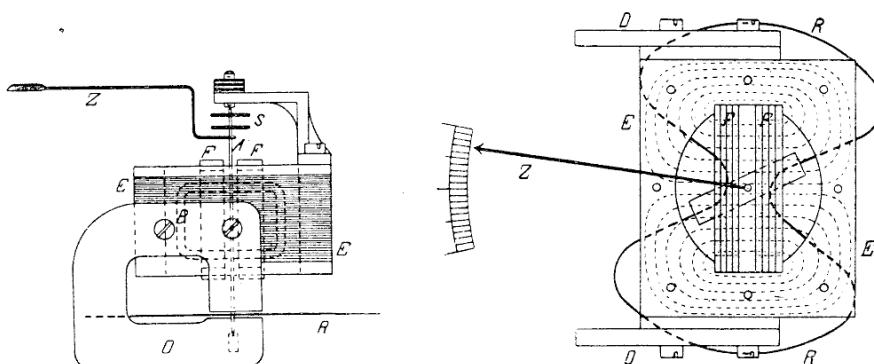


FIG. 61. — Détails de construction des instruments électrodynamiques de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

La figure 61 montre la disposition adoptée : E est une pièce, formée de tôles assemblées, au milieu de laquelle est pratiquée une ouverture, limitée par des arcs de cercle, dans laquelle est placée la bobine F. A l'intérieur de cette bobine F, se trouve la bobine B, mobile et portée par l'axe A monté sur pivots; cet axe porte en même temps l'aiguille Z et une plaque d'aluminium R en forme de 8, dont les bords s'engagent entre les pôles de deux aimants amortisseurs D. L'entrefer de ces aimants est réduit au minimum afin d'augmenter l'amortissement; ils ont leurs pôles disposés de manière à compenser la faible action qu'ils pourraient avoir sur la bobine mobile dont ils sont d'ailleurs éloignés le plus possible.

La pièce de fer feuilletée E a pour objet de concentrer le flux magnétique développé par

les bobines et à leur donner la forme que montre le dessin de droite de la figure 61. Dans ces conditions, les aimants amortisseurs ne sont pas influencés par les flux magnétiques développés par les bobines.

Dans les ampèremètres (*fig. 62*), la bobine fixe est parcourue par le courant à mesurer, tandis que la bobine mobile est montée en dérivation sur l'ensemble constitué par la bobine fixe et une résistance mise en série avec elle.

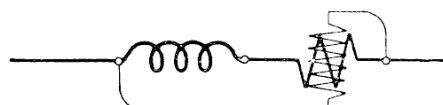


Fig. 62. — Connexions des bobines de l'ampèremètre électrodynamique de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

Le coefficient de température du métal dont est fait le fil des bobines n'est pas négligeable, comme c'est le cas, du reste, pour les ampèremètres électromagnétiques à bobine mobile ; car si on voulait mettre en dérivation une forte résistance indépendante des variations de température, on

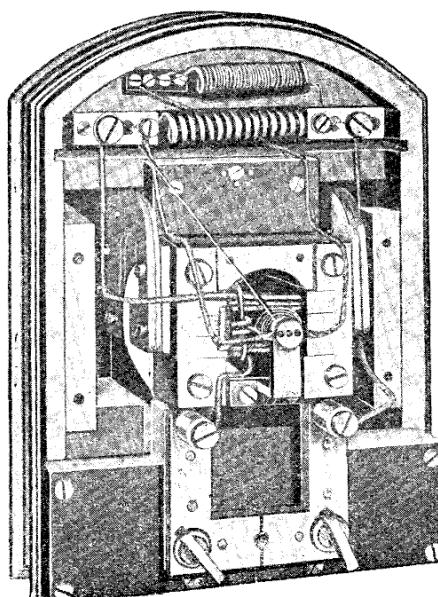


Fig. 63. — Ampèremètre électrodynamique de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

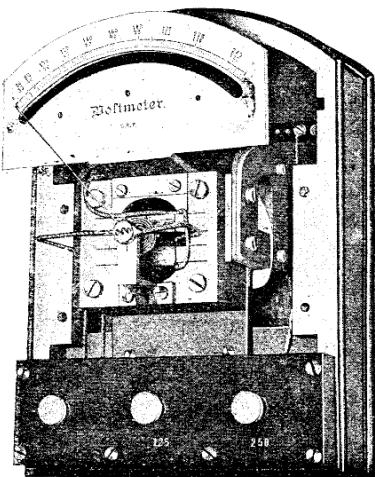


Fig. 64. — Voltmètre électrodynamique de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

serait obligé de monter en série, avec la bobine fixe, une résistance qui consommerait beaucoup d'énergie. Il est, du reste, facile de compenser l'effet du coefficient de température en prenant, pour constituer les bobines fixes, un métal dont le coefficient de température soit le même que celui de la dérivation.

Dans le voltmètre (*fig. 64*), la bobine fixe et la bobine mobile sont mises en série avec une résistance additionnelle. L'instrument comporte deux échelles, l'une allant jusqu'à 125 volts et l'autre jusqu'à 250 volts. La résistance totale des deux bobines est d'environ 130 ohms et la résistance additionnelle de 2 000 ohms, soit en tout 2 130 ohms. Dans ces conditions, la puissance absorbée par l'instrument pour son fonctionnement est de 3 watts à 250 volts, consommation très faible pour des instruments de ce genre.

Le coefficient de température de la résistance additionnelle étant très faible, on peut considérer comme négligeable celui de l'ensemble, car il est d'environ 0,0024.

Dans les ampèremètres, comme dans les voltmètres, le couple produisant la déviation de

L'aiguille dépend de l'intensité du courant qui traverse la bobine mobile, intensité qui varie suivant l'impédance de cette bobine. Théoriquement, les indications de ces instruments dépendent de la fréquence; en réalité, cette action est négligeable, car l'impédance diffère très peu de la résistance, parce que les bobines se déplacent dans un espace de très grande réluctance, puisque les flux ne traversent le fer qu'à leur retour, la majeure partie du circuit magnétique étant constituée par l'air.

Quant à l'hystéresis, l'induction dans le fer est si faible qu'on ne remarque aucune influence.

La meilleure preuve que les indications données par ces instruments sont indépendantes de la fréquence est que, pour un courant de fréquence 50 et pour un courant continu, les indications sont sensiblement les mêmes. Par suite, l'influence de la forme de la courbe est absolument négligeable.

Voltmètre du laboratoire Volta. — Cet instrument, construit et exposé par la maison Gaiffe, de Paris, se compose de deux bobines fixes B et B' (fig. 65), entre lesquelles, montée sur pivots, est placée une bobine mobile b, dont l'enroulement est disposé, de part et d'autre de l'axe, sur une carcasse en bois durci.

Les bobines fixes et mobile sont reliées en série et les communications avec cette dernière sont établies par l'intermédiaire de ressorts spiraux qui produisent, en même temps, le couple antagoniste.

Une résistance non inductive R, montée en tension avec les bobines du voltmètre, complète cet instrument.

La bobine mobile ne pèse que 5 grammes.

Une clé permet de mettre en court-circuit une partie de la résistance additionnelle afin de faire varier la sensibilité de ce voltmètre qui, par suite, porte deux graduations : l'une de 25 à 75 volts et l'autre de 50 à 150 volts. On remarquera que les graduations ne peuvent commencer à zéro, car le couple produisant la déviation serait à ce moment insuffisant pour produire une action utile sur la bobine mobile.

Ce voltmètre peut être utilisé aussi bien avec les courants alternatifs qu'avec le courant continu. Dans ce dernier cas, l'erreur ne dépasse pas 0,30/0 lorsqu'on fait varier la fréquence entre 10 et 80 périodes par seconde.

Pour établir cet instrument, on peut employer un courant continu, mais à la condition de renverser le sens du courant chaque fois que l'on veut déterminer un point de la graduation. On élimine ainsi l'action perturbatrice exercée par le champ magnétique terrestre; il suffit de prendre la moyenne des deux lectures effectuées chacune avec un même courant de sens différent pour obtenir une graduation exacte.

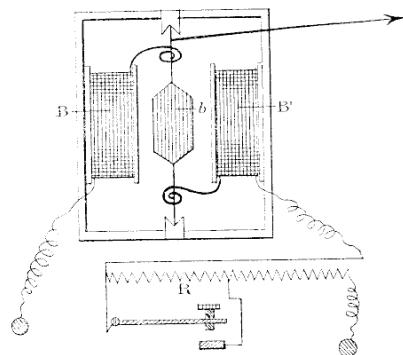


FIG. 65. — Voltmètre électrodynamique du laboratoire Volta.

INSTRUMENTS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Instruments à bobine et à aimant fixes avec fer doux mobile. — Ces instruments ne peuvent être utilisés que pour le courant continu. La diminution du moment magnétique de l'aimant avec le temps et aussi par suite de leur fonctionnement en a limité l'emploi.

AMPÈREMÈTRE ET VOLTMÈTRE DEPREZ-CARPENTIER. — Ces instruments (fig. 66) se composent d'une bobine fixe B et d'une pièce de fer doux ou armature A, mobile autour d'un axe a; cette armature, placée à l'intérieur de la bobine B, est orientée par un double aimant recourbé NS et N'S' et porte une aiguille indicatrice G qui se déplace sur un cadran gradué.

L'équipage mobile est équilibré et l'instrument peut être utilisé indifféremment dans une position horizontale ou verticale.

Ces instruments indiquent par construction le sens du courant, lorsque les communications sont établies normalement.

Dans les ampèremètres, l'enroulement de la bobine B est constitué par une lame de cuivre rouge isolée et enroulée plusieurs fois sur elle-même ; cette lame a 1 cm de largeur et une épaisseur variable suivant l'intensité maximum du courant que doit mesurer l'instrument.

Dans les voltmètres, l'enroulement est fait en fil fin isolé et la résistance de la bobine est appropriée à la différence de potentiel maximum pour laquelle l'instrument a été établi.

Ces instruments sont apériodiques et ce sont les aimants NS et NS' qui sont utilisés comme force antagoniste s'opposant à l'action exercée par le flux de la bobine sur l'armature mobile.

Pour rendre les déviations à peu près proportionnelles soit à l'intensité du courant,

soit à la différence de potentiel, résultat qu'on n'aurait pu obtenir si l'axe de la bobine avait été placé normalement à la ligne des pôles des aimants, puisque le couple dû à l'action du courant aurait été en s'affaiblissant à mesure que la déviation de l'équipage mobile aurait augmenté, la bobine a été légèrement inclinée sur la ligne des pôles. Dans ces conditions, le passage du courant dans la bobine tend à ramener l'armature dans une position parallèle aux spires de l'enroulement et le couple exercé par la bobine croît alors en même temps que celui que produisent les aimants directeurs.

La sensibilité de ces instruments peut être réduite à l'aide d'un shunt approprié qui se relie aux bornes en même temps que les conducteurs du circuit.

Ces instruments sont construits et exposés par M. J. Carpentier, de Paris.

VOLTMÈTRE J. RICHARD. — Cet instrument, qui n'a que 8 cm de diamètre, est plus spécialement destiné à l'essai des piles et des accumulateurs (*fig. 67*).

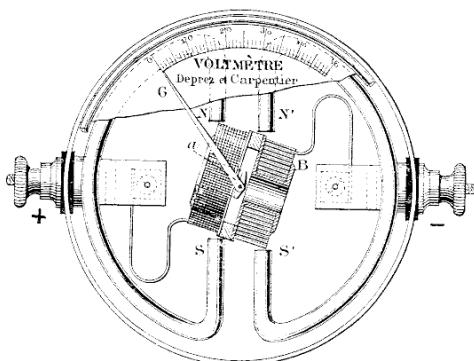


FIG. 66. — Voltmètre Deprez-Carpentier.

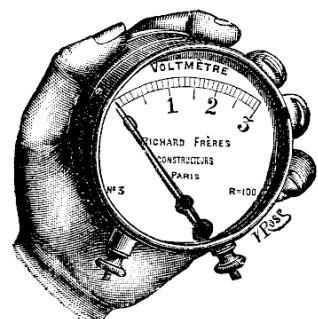


FIG. 67. — Voltmètre J. Richard pour l'essai des accumulateurs.

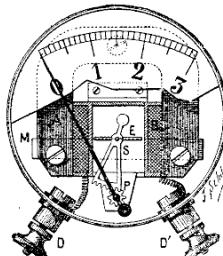


FIG. 68. — Détails de construction du voltmètre J. Richard.

Il comporte une bobine fixe B (*fig. 68*) que parcourt le courant à mesurer et un équipage mobile constitué par une armature de fer doux E, mobile autour d'un axe passant par son centre de gravité. La force antagoniste est produite par un aimant en fer à cheval A. Cet aimant est solidement fixé sur une platine en cuivre au moyen de trois fortes vis ; sur la même platine et

entre les pôles de l'aimant, est montée la carcasse de la bobine, dont les extrémités de l'enroulement aboutissent à deux bornes D, D' servant de prises de courant.

L'équipage mobile, placé au centre de la bobine, est monté sur un axe pivotant sur agates; il porte un secteur S, à denture très fine, engrenant avec un pignon P. C'est sur l'axe de ce pignon qu'est fixée l'aiguille indicatrice qui se meut devant un cadran divisé. Pour que ces deux axes qui se commandent soient toujours à une distance invariable, ils sont montés dans une chape commune qui les rend solidaires, disposition essentielle pour obtenir un bon fonctionnement.

Toutes les pièces de l'instrument étant équilibrées, la position de l'aiguille est indépendante de la position donnée au voltmètre.

L'angle de déviation de l'armature, sous l'action du courant traversant la bobine, est amplifié au moyen du secteur denté et du pignon qu'il commande; on obtient ainsi un grand déplacement de l'aiguille pour un faible déplacement de l'armature. L'amplification mécanique des déviations présente l'avantage de produire des déplacements de l'aiguille sensiblement proportionnels aux courants, puisque l'armature, se déplaçant très peu, reste toujours dans un champ magnétique à peu près constant.

Ce qui caractérise cet instrument, c'est l'emploi d'un aimant armé; l'armature de l'aimant étant constituée par une barrette de fer doux M, maintenue par une lame de laiton reposant sur deux piliers fixés sur la platine de l'instrument. Dans ces conditions, le circuit magnétique de l'aimant étant fermé, l'aimantation reste sensiblement constante; en outre, en faisant varier la position de cette barrette, on obtient un couple directeur plus ou moins élevé et on peut modifier à volonté la sensibilité de l'instrument.

Suivant la résistance donnée à l'enroulement de la bobine B, l'instrument peut être utilisé comme voltmètre ou comme ampèremètre.

L'instrument est apériodique et, comme il est polarisé, le sens de la déviation de l'aiguille dépend du sens dans lequel passe le courant.

VOLTMÈTRE TH. HORN. — Le Dr Th. Horn, de Leipzig, avait exposé un voltmètre dont la figure 69 montre la disposition schématique.

A l'intérieur d'une bobine fixe b est placée une armature mobile en fer doux a. Un aimant NS, dont la branche N est plus longue que la branche S, a cette branche N recourbée de manière que le flux agissant sur l'armature a ait une direction oblique. Dans ces conditions, l'action de cet aimant se combine avec celle de la bobine b, traversée par le courant, pour donner à l'armature a une orientation résultante. La bobine b est placée obliquement par rapport à la ligne sn.

L'aimant est armé partiellement par un shunt magnétique constitué par deux pièces de fer doux ff', que l'on peut rapprocher ou éloigner en agissant sur le bouton V' de la vis V à deux filets de sens inverse.

Instruments à bobine fixe et à fer doux mobile. — Parmi les nombreux modèles exposés, nous citerons les suivants :

AMPÈREMÈTRE ET VOLTMÈTRE JAVAUX. — Ces instruments ont été les premiers construits parmi ceux qui sont basés sur les actions attractive et répulsive de légères pièces de fer doux aimantées par le courant qui traverse la bobine à l'intérieur de laquelle elles sont placées.

A l'intérieur d'une bobine A (fig. 70) se trouvent deux pièces de fer doux fixes B, B' et une autre pièce de fer doux mobile F pouvant osciller autour des pivots qui la supportent. La force antagoniste est produite par l'action de la pesanteur sur un contrepoids qui tend à ramener constamment dans sa position initiale l'aiguille indicatrice D, solidaire de la pièce F.

Pour que ces instruments fonctionnent régulièrement, il est nécessaire qu'ils soient placés

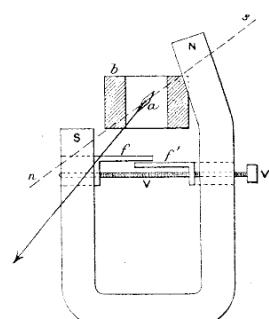


FIG. 69. — Voltmètre Th. Horn.

dans une position parfaitement verticale. On arrive facilement à ce résultat, lorsqu'on les met en place, en inclinant l'instrument à gauche ou à droite jusqu'à ce que l'aiguille indicatrice se trouve bien en regard du zéro de la graduation quand il ne passe pas de courant.

L'absence de tout ressort donne à ces instruments une grande constance et le volume des pièces de fer doux est si minime que les effets dus à l'hystérisis n'entraînent qu'une faible erreur de 2 0/0 au maximum.

AMPÈREMÈTRES ET VOLTMÈTRES CHAUVIN ET ARNOUX. — Les ampèremètres et voltmètres Chauvin et Arnoux, type industriel et type demi-précision (fig. 71 et 72), sont constitués par une bobine ayant comme noyau une bande de tôle de fer très mince affectant en plan la forme que montre la figure 73.

La partie AB de ce noyau est repliée pour venir en A au centre de la circonference. En ce point A se trouve, fixée sur deux pivots, une plaque de tôle AC, également très mince, qui est

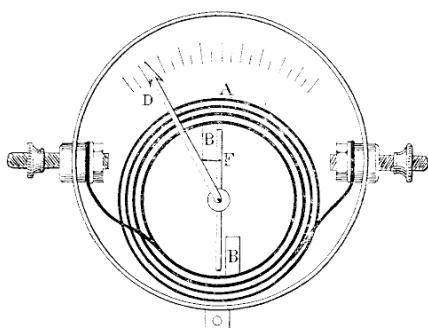


FIG. 70. — Ampèremètre Javaux.

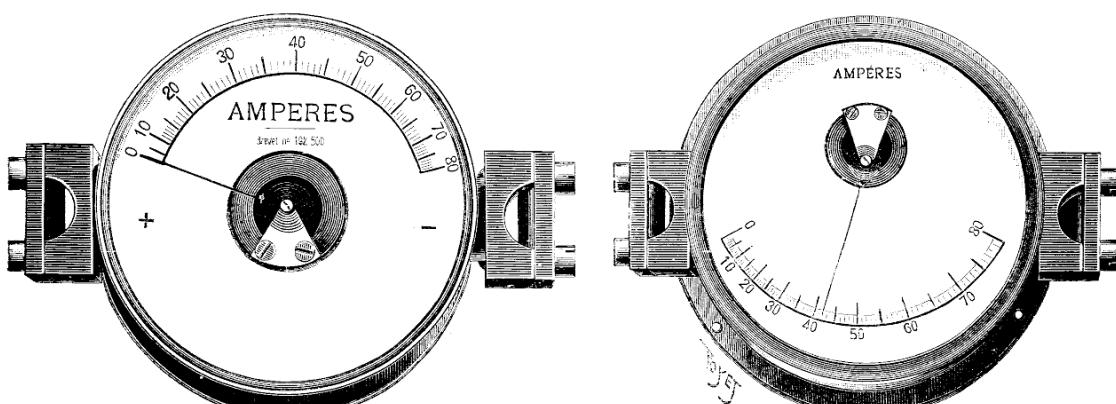


FIG. 71. — Ampèremètre Chauvin et Arnoux, type industriel.

FIG. 72. — Ampèremètre Chauvin et Arnoux, type demi-précision.

mobile autour du point A et peut venir s'appliquer contre la partie fixe AB. Lorsqu'un courant circule dans la bobine, le noyau s'aimante et le volet mobile AC, qui est en contact avec elle, prend la même polarité; il y a, par conséquent, répulsion. Une aiguille indicatrice est solidaire du volet mobile AC et se meut devant les divisions du cadran gradué. Comme couple antagoniste, on utilise un ressort spiral qui tend à ramener constamment l'aiguille au zéro de la graduation. Cette aiguille étant équilibrée, l'instrument fonctionne dans toutes les positions.

Les voltmètres ne diffèrent des ampèremètres que par la résistance de la bobine fixe.

AMPÈREMÈTRE POUR COURANTS ALTERNATIFS DU LABORATOIRE VOLTA. — Cet instrument, construit et exposé par la maison Gaiffe, comporte une bobine fixe au centre de laquelle

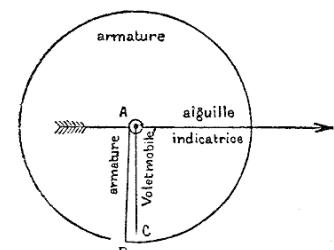


FIG. 73. — Détails de construction des voltmètres et ampèremètres Chauvin et Arnoux.

est disposé un tube en fer doux *a*, également fixe et muni d'un bras *c* (fig. 74).

Au centre du tube fixe *a*, est monté sur pivots un axe en fer doux *b*, qui est muni également d'un bras *c*, mobile avec lui.

Sous l'action du passage du courant dans l'instrument, il se produit des répulsions entre les bras fixe et mobile qui prennent la même polarité. Le couple produit est d'autant plus grand que les bras sont plus longs.

Entre les limites de 40 à 80 périodes par seconde, les écarts des indications, du fait de l'hystérosis, ne dépassent pas 4 à 5 0/0.

AMPÈREMÈTRE ET VOLTMÈTRE DE LA COMPAGNIE GÉNÉRALE D'ÉLECTRICITÉ DE CREIL (ANCIENS ÉTABLISSEMENTS DAYDÉ ET PILLÉ). — Ces instruments (fig. 73) ont un équipage mobile constitué par une mince feuille de tôle rectangulaire fixée par un de ses grands côtés sur un axe monté sur pivots.

Cette feuille de tôle affecte la forme d'une portion de cylindre et l'axe de rotation est excentré par rapport à celui de la bobine fixe qui entoure cette armature.

Sous l'influence du champ magnétique développé par le passage du courant dans la bobine fixe, l'extrémité libre de la feuille de tôle, constituant l'armature, tend à se rapprocher de la bobine. L'effort antagoniste est produit par l'action de la pesanteur sur un contre-poids que porte l'axe de l'aiguille indicatrice.

Les voltmètres ne diffèrent des ampèremètres que par l'enroulement de la bobine. Ces instruments commencent à donner des indications pour une valeur d'intensité ou de tension voisine du dixième de la valeur maximum pour laquelle ils sont établis. On peut les utiliser avec les courants continus et aussi avec les courants alternatifs ; mais, dans ce dernier cas, leurs indications ne sont valables que pour la fréquence des courants qui ont servi à les étalonner.

AMPÈREMÈTRES ET VOLTMÈTRES J. RICHARD. — Ces instruments (fig. 76) sont combinés en vue d'obtenir un grand déplacement angulaire de l'aiguille indicatrice, en même temps qu'une proportionnalité presque parfaite entre les intensités ou les tensions du courant à mesurer et les angles de déviation.

Ces instruments se composent d'un électro-aimant, traversé par le courant à mesurer, qui agit sur une armature en fer doux mobile autour d'un axe parallèle à ceux des bobines de l'électro-aimant. Cette armature, dont la forme rappelle celle d'une hélice (fig. 77), a une surface incurvée par rapport au plan passant par l'extrémité des noyaux. L'enroulement des bobines de l'électro-aimant est constitué, dans l'ampèremètre, par des lames de cuivre rouge isolées, dont l'épaisseur varie d'après l'intensité maximum du courant pour laquelle l'instrument a été établi et, dans le voltmètre, par du fil isolé plus ou moins fin, suivant la résistance qu'il est nécessaire de lui donner.

Suivant la position de l'armature devant les pôles de l'électro-aimant, la réluctance du

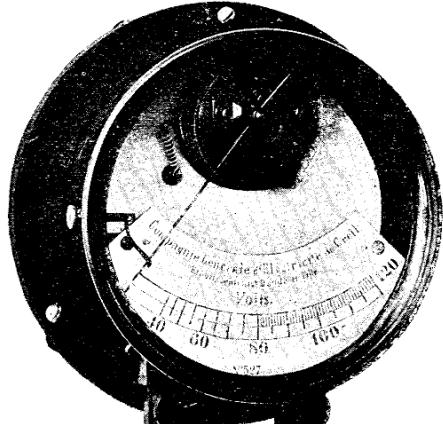


FIG. 73. — Ampèremètre de la Compagnie Générale d'Électricité de Creil.

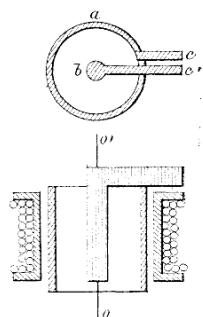


FIG. 74. — Ampèremètre pour courants alternatifs du laboratoire Volta.

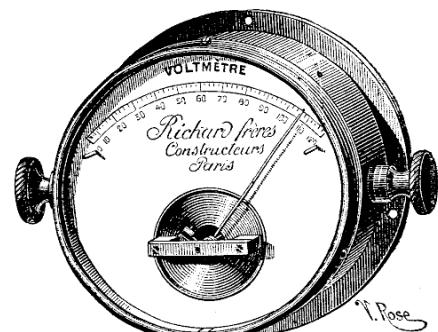


FIG. 76. — Voltmètre J. Richard.

circuit magnétique prend des valeurs variables. Au repos, c'est-à-dire lorsque l'index est au zéro, cette réluctance est maximum ; lorsqu'un courant traverse les bobines, l'armature tourne autour de son axe en fonction de l'intensité ou de la tension du courant. Au couple ainsi produit est opposé un couple antagoniste constitué par un poids suspendu à l'extrémité d'un petit levier ; par suite, l'équipage mobile prend une position d'équilibre. Les efforts développés sont suffisamment grands pour qu'on puisse amplifier les déviations et obtenir sur le cadran divisé une étendue de 270° .

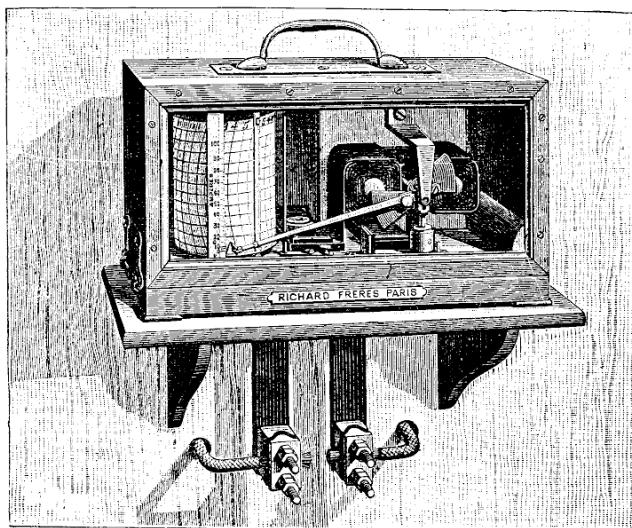


FIG. 77. — Ampèremètre enregistreur J. Richard.

Les mêmes instruments se construisent avec un dispositif enregistreur (fig. 77). L'armature est alors munie d'un levier dont l'extrémité porte une plume qui se déplace, suivant les variations de l'intensité ou de la tension du courant, devant un tambour effectuant une révolution complète en une heure, un jour ou une semaine, suivant les cas, et qui est garni d'une feuille de papier qui reçoit le tracé. Cette feuille peut être remplacée par une bande sans fin qu'un mouvement d'horlogerie fait défiler devant la plume avec une vitesse pouvant atteindre 3 cm par minute.

Une échelle graduée, placée suivant l'une des génératrices du cylindre, permet de lire à chaque instant les indications données par l'instrument.

VOLTMÈTRE HARTMANN ET BRAUN. — Ces voltmètres, dont la figure 78 montre l'aspect extérieur, sont constitués par une bobine fixe à l'intérieur de laquelle sont disposées des armatures ayant la forme d'une portion de cylindre, en tôle mince, l'une fixe et l'autre mobile autour de l'axe qui porte en même temps l'aiguille indiquatrice.

En découpant d'une certaine manière les armatures de tôle, on arrive à obtenir des divisions presque proportionnelles dans le voisinage de la partie utilisée de la graduation.

Un index de couleur rouge, mobile de l'extérieur, peut être amené devant la division correspondant à la tension normale.

Comme tous les instruments de cette catégorie, la graduation n'est utilisable avec les courants alternatifs que pour une fréquence déterminée.

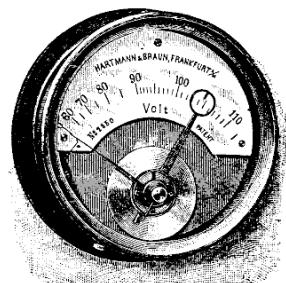


FIG. 78. — Voltmètre Hartmann et Braun.

AMPÈREMÈTRE HARTMANN ET BRAUN. — Cet instrument (fig. 79) est construit comme le galvanomètre à ressort de Kohlrausch. Il se compose d'un tube de cuivre découpé en spirale sur le tour. Les spires ainsi constituées sont traversées par le courant à mesurer.

A l'intérieur de cette sorte de bobine est disposé un noyau de fer doux mobile susceptible d'être plus ou moins attiré. Ce noyau s'articule sur un petit levier fixé sur l'axe qui porte, en même temps, l'aiguille indicatrice.

Naturellement, comme dans tous les instruments de ce genre, les points de la graduation voisins du zéro sont très rapprochés et, par conséquent, les lectures sont peu précises.

AMPÈREMÈTRE ET VOLTMÈTRE SIEMENS ET HALSKE. — Ces instruments, dont la figure 80 montre la vue d'ensemble, sont apériodiques et peuvent être utilisés avec les courants alternatifs comme avec les courants continus.

L'équipage mobile est constitué par une pièce de fer doux de forme particulière, soigneusement étudiée, munie d'une aiguille pouvant se déplacer devant une échelle graduée en volts ou en ampères, suivant le cas. Sous l'action du passage du courant dans la bobine fixe, la pièce de fer doux est attirée

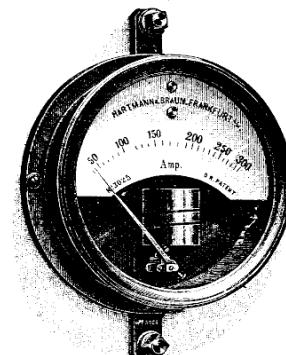


FIG. 79. — Ampèremètre Hartmann et Braun.

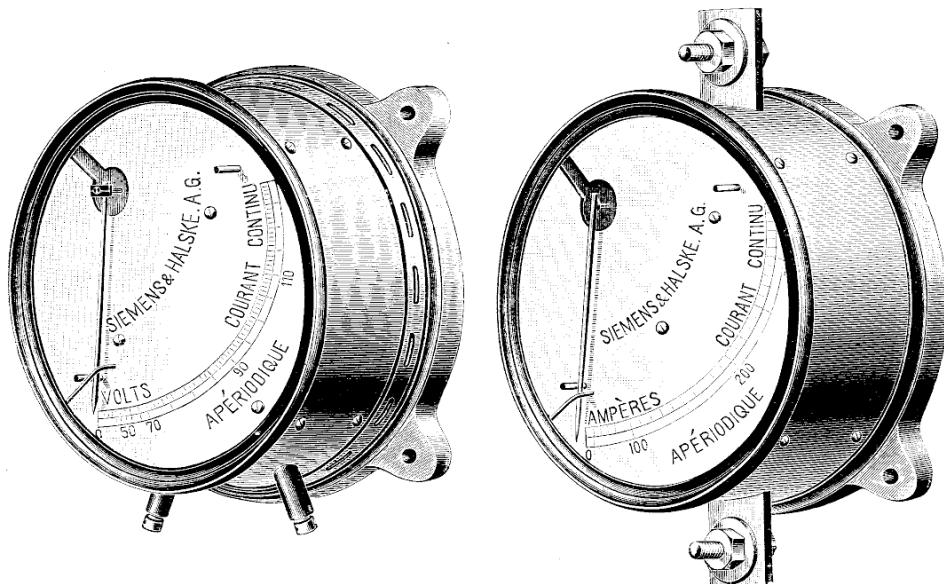


FIG. 80. — Voltmètre et ampèremètre apériodiques Siemens et Halske.

vers l'intérieur de la bobine, en sens contraire de l'action de la pesanteur qui constitue le couple antagoniste.

Ces instruments, ne comportant ni ressorts ni aimant directeur, ne sont pas susceptibles de se dérégler une fois étalonnés.

La figure 81 donne la vue intérieure de l'ampèremètre.

Le boîtier de ces instruments est en tôle de fer doux et constitue écran magnétique de protection contre l'action des champs magnétiques voisins et extérieurs.

La forme allongée de la bobine fixe permet de rapprocher beaucoup l'armature de fer doux de l'enroulement et d'obtenir ainsi une grande sensibilité, tout en diminuant le nombre de spires.

L'équipage mobile (*fig. 82*), muni d'un dispositif de réglage pour amener l'aiguille au zéro de la graduation, est monté sur un axe en acier trempé dur, pivotant dans des trous garnis de pierres fines.

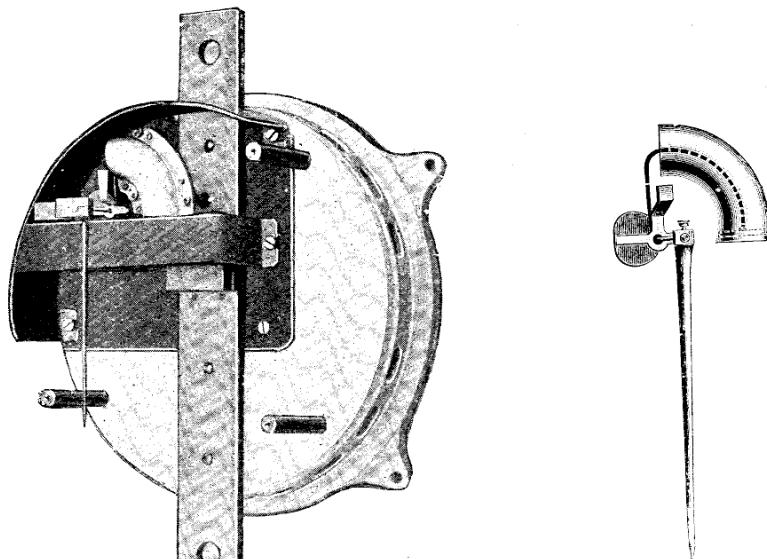


Fig. 81. — Intérieur de l'ampèremètre Siemens et Halske.

Fig. 82. — Équipage mobile des instruments Siemens et Halske.

Cet équipage est muni, en outre, d'un amortisseur à air (*fig. 81*), déjà appliqué avec succès à d'autres instruments de la même maison.

Les voltmètres et ampèremètres de ce type se construisent, si on le désire, avec double graduation : l'une pour le courant continu, l'autre pour les courants alternatifs d'une fréquence déterminée.

VOLTMÈTRE HORN. — Dans un solénoïde vertical *S* (*fig. 83*) passent, par le haut et par le bas, des anneaux en tôle de fer *R*, attachés aux bras de leviers articulés formant une sorte de balance.

Les anneaux pénètrent d'autant plus dans le solénoïde que la tension du courant est plus grande ; ces anneaux se rapprochent quand ils sont attirés et s'écartent dans le cas contraire.

Le bras *ab*, mobile autour du pivot *o*, supporte deux tiges *ac*, *bd* supportant les anneaux de fer *R*, *R'*. Ces tiges s'articulent en *cd* à deux bielles *ce*, *df* pivotant autour des points fixes *e*, *f*.

L'anneau *R'* est plus lourd que l'anneau *R*, ce qui produit le couple résistant.

Grâce à l'importance des efforts en jeu, les effets dus aux frottements des articulations sont négligeables.

Les instruments exposés portent deux graduations. L'une, en traits noirs, est valable pour le courant continu ; l'autre, en traits rouges, est relative aux courants alternatifs de fréquence ordinaire (environ 30 périodes par seconde).

VOLTMÈTRE BREGUET. — Cet instrument (*fig. 84*), qui ne peut être utilisé qu'avec le courant continu, se compose d'une armature de fer doux *f* montée sur un axe et placée dans l'alésage polaire d'un électro-aimant en fer à cheval *E*. Un ressort spiral *r* agit sur l'armature mobile comme forcee antagoniste.

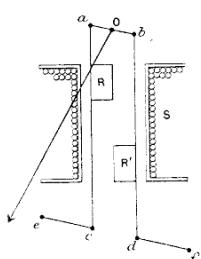


Fig. 83. — Voltmètre Horn.

Les bobines excitatrices de l'électro-aimant sont montées en dérivation sur le circuit dont on veut mesurer la tension. Elles développent dans l'entrefer un flux qui est à peu près proportionnel à la tension aux bornes.

Le couple moteur dans cet instrument est puissant, ce qui permet de le rendre presque apériodique en donnant une faible masse à l'armature de fer doux.

Cet instrument présente des effets d'hystérésis assez notables, à cause de la masse du fer de l'électro-aimant. On en corrige les effets en interrompant le courant un instant avant chaque mesure.

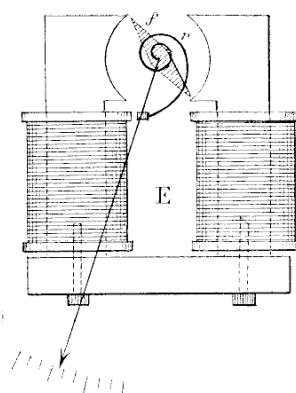


FIG. 84. — Voltmètre Breguet.

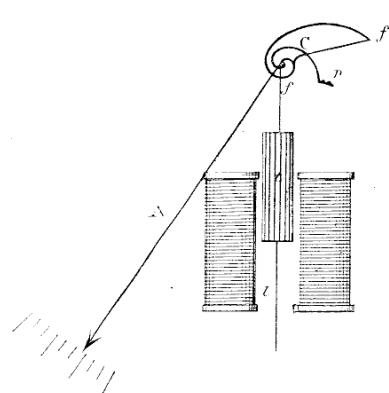


FIG. 85. — Ampèremètre Breguet.

AMPÈREMÈTRE BREGUET. — L'ampèremètre Breguet (fig. 85) est constitué par une bobine fixe, traversée par le courant à mesurer et à l'intérieur de laquelle est disposé un petit tube de fer doux très mince t , suspendu par un fil de soie f fixé à l'extrémité f' d'une came C, dans la gorge de laquelle il passe. Cette came est montée sur un axe qui porte en même temps l'aiguille indicatrice A. Un ressort spiral r constitue le couple antagoniste. A sa partie inférieure, l'armature t se prolonge par un petit fil de laiton l qui sert à guider ses mouvements et qui traverse une platine non figurée sur le dessin.

Cet ampèremètre peut servir pour les courants continus et pour les courants alternatifs. Dans ce dernier cas, la graduation n'est exacte que si le courant à mesurer a la même fréquence et la même forme de courbe que celui qui a servi à l'étalonner.

AMPÈREMÈTRE LORD KELVIN. — Cet instrument (fig. 86), connu sous le nom anglais d'*ampère gauge*, est l'instrument le plus précis de tous les ampèremètres électromagnétiques.

La bobine fixe, de forme spéciale, est disposée sur le haut de la cage vitrée renfermant l'équipage mobile. Cette bobine est constituée par des tubes concentriques de cuivre, découpés en hélices de sens alterné, ou des disques de même métal isolés entre eux par interposition de mica.

L'armature mobile est formée par un mince fil de fer doux. Au repos, cette armature est maintenue par l'action de la pesanteur, grâce à un contre-poids suspendu à un fil et visible sur la droite de la figure; lorsqu'un courant traverse la bobine, le fil est attiré et entraîne avec lui l'aiguille indicatrice. L'instrument est rendu apériodique par un ressort spiral.

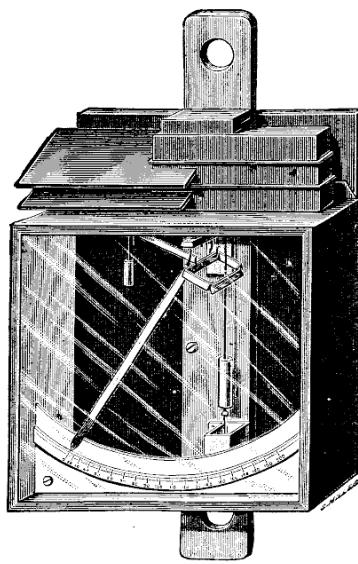


FIG. 86. — Ampèremètre lord Kelvin.

dique par un système amortisseur consistant en un petit disque immergé dans l'huile et fixé à la partie inférieure du contrepoids. L'ensemble de l'équipage mobile est porté par une suspension à couteau.

Les conducteurs amenant le courant se fixent ou se soudent sur les barres métalliques qui émergent de la boîte en haut et en bas et qui servent en même temps à fixer l'instrument verticalement. Une plaque en matière isolante est montée sur la face verticale postérieure de la boîte.

Les premiers modèles de cet instrument présentaient l'inconvénient de ne pas être apériodiques; les modèles actuels ne le présentent plus et sont, en outre, disposés pour être à l'abri des influences des champs magnétiques extérieurs d'intensité moyenne.

Gradués spécialement, ils conviennent pour la mesure des courants alternatifs.

On peut également les utiliser sur les circuits à haute tension, à cause du soin apporté à leur isolement; l'ensemble de l'instrument est monté sur marbre.

Instruments à bobine mobile et à aimant fixe. — Ces instruments sont aujourd'hui les plus répandus dans les installations à courant continu; aussi de nombreux modèles figuraient à l'Exposition.

VOLTMÈTRE CARPENTIER. — Le voltmètre Carpentier (fig. 87) comporte un aimant fixe de forme presque circulaire, dont les extrémités sont prises entre deux brides faisant corps avec

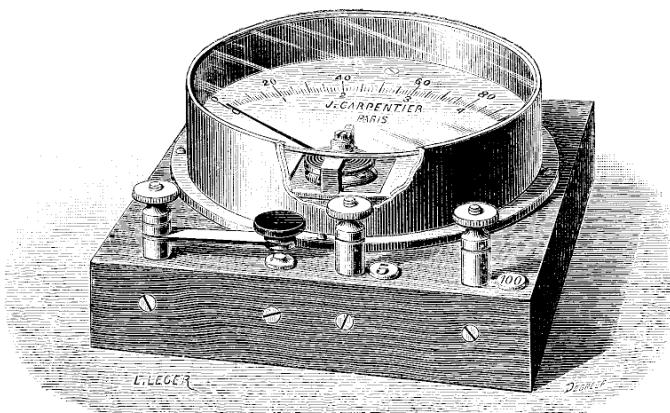


FIG. 87. — Voltmètre de précision Carpentier.

des pièces polaires en fer doux entre lesquelles est placée la bobine mobile. Ces pièces polaires sont solidement assemblées à l'aide de deux barrettes de laiton qui supportent en même temps le noyau central en fer doux du cadre mobile, noyau qui est fixe, et deux ponts munis de vis garnies de rubis qui servent à la suspension entre pivots de l'équipage mobile.

La bobine mobile est formée d'un cadre en cuivre rouge, à bords relevés, qui sert d'amortisseur et sur lequel est enroulé le fil isolé. Des ressorts spiraux, en bronze phosphoreux, sont fixés au centre de la bobine fixée verticalement sur son axe; l'extrémité libre d'un de ces ressorts est fixe et maintenue dans sa position par une goupille isolée, tandis que l'extrémité libre de l'autre ressort est solidaire d'une pièce mobile permettant de régler la position initiale de l'équipage.

L'index que porte le cadre mobile est une aiguille très mince en aluminium qui se déplace devant un cadran gradué.

Ces voltmètres ont une résistance très élevée (13 000 ohms pour les voltmètres de 120 volts); par suite, ils n'absorbent que très peu d'énergie pour leur fonctionnement. Malgré cela, on ne doit pas les laisser constamment en circuit afin d'éviter tout échauffement; à cet

effet, chaque voltmètre est muni d'une clé de contact que l'on est dans l'obligation d'abaisser toutes les fois que l'on veut mettre l'instrument en service.

La résistance est répartie en deux bobines inégales dont l'une, la plus faible, a une de ses extrémités reliée à la borne placée sur la clé de contact, tandis que l'autre extrémité aboutit à une borne intermédiaire, marquée 3 sur la figure 87; la résistance totale, comprenant les deux bobines montées en série, est reliée, d'une part, à la borne placée sur la clé et, d'autre part, à la troisième borne marquée 100.

L'échelle porte, par suite, deux graduations et l'instrument peut servir pour mesurer, par exemple, des tensions comprises entre 1 et 3 volts ou entre 1 et 100 volts, suivant que l'un des conducteurs extérieurs est rattaché à la borne 3 ou à la borne 100. Sur la graduation inférieure, chaque division correspond à $\frac{1}{20}$ de volt et sur l'échelle supérieure chaque division vaut 1 volt.

Ces voltmètres se construisent également en plusieurs dimensions et sans socle pour être placés sur les tableaux de distribution.

VOLTMÈTRE WESTON. — La Weston Electrical Instrument Company, de Newark (États-Unis), n'avait exposé qu'un voltmètre de précision.

Cet instrument, bien connu de tous les électriques (fig. 88), a une bobine mobile enroulée sur un cadre en cuivre servant d'amortisseur. Cette bobine est montée sur pivots entre les pôles d'un aimant puissant; un noyau de fer doux sert à uniformiser le flux dans l'entrefer et à rendre ainsi les divisions de la graduation égales.

La résistance placée en série avec la bobine mobile est en fil de maillechort et sa résistance est très grande par rapport à celle de la bobine mobile. Dans ces conditions, les indications fournies par le voltmètre sont pratiquement indépendantes des variations de la température. Toutefois, lorsqu'on veut en tenir compte, il suffit de consulter un thermomètre faisant corps avec l'instrument et de se reporter à une table de correction qui l'accompagne. Afin d'éviter les erreurs de parallaxe, le cadran porte un miroir et, lorsqu'on fait une lecture, il suffit que l'aiguille et son image soient superposées pour apprécier exactement la déviation.

Les instruments de cette maison sont universellement réputés pour la constance des indications qu'ils fournissent, résultat qui provient d'un traitement particulier que subit l'aimant et qui a pour effet de lui assurer une aimantation invariable avec le temps.

AMPÈREMÈTRES ET VOLTMÈTRES CHAUVIN ET ARNOUX. — Le cadre galvanométrique mobile est constitué par une petite couronne de fil de cuivre recouvert de soie (fig. 89). Cette couronne est serrée entre deux bagues concentriques de cuivre pur, découpées dans du tube sans soudure. Les deux extrémités du fil sont respectivement reliées par une soudure à chacune de ces bagues qui n'ont pas seulement pour objet de donner au cadre galvanométrique une rigidité qu'il ne pourrait posséder sans cela, mais aussi de servir d'amortisseur électromagnétique très énergique.

Le cadre mobile ainsi constitué est muni, suivant un de ses diamètres, de deux petits pivots en acier pénétrant dans deux crapaudines en pierre fine qui réduisent les frottements au minimum et isolent le cadre électriquement. Deux ressorts spiraux s , s' , en bronze phosphoreux, servent de conducteurs au courant et développent en même temps le couple antagoniste qui doit faire équilibre au couple électromagnétique développé par l'aimant fixe sur le cadre, quand ce dernier est par-

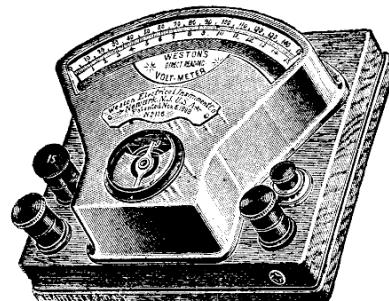


FIG. 88. — Voltmètre Weston.

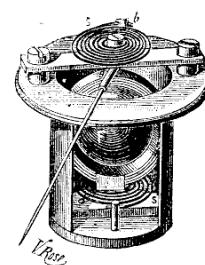


FIG. 89. — Détails du cadre mobile des instruments Chauvin et Arnoux.

couru par un courant. Ces deux ressorts spiraux agissent en opposition afin d'assurer la fixité du zéro de l'aiguille indicatrice; celle-ci est en aluminium pour réduire au minimum le moment d'inertie de l'équipage mobile.

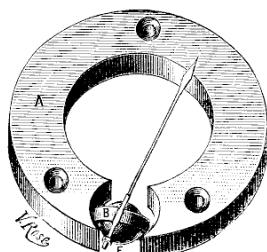
Cet équipage, parfaitement équilibré, est renfermé dans un tube à embase qui s'engage entre les pôles de l'aimant A en forme d'anneau ou de tore (fig. 90); ce tube est muni à ses deux

extrémités d'une traverse sur le milieu de laquelle est fixée la chape d'une des deux crapaudines supportant les extrémités de l'axe de l'équipage mobile.

A l'intérieur du cadre galvanométrique est centrée et fixée une bille d'acier F qui diminue la réluctance du circuit magnétique de l'aimant.

Dans les ampèremètres (fig. 91), le circuit du cadre galvanométrique a une résistance moyenne de 0,5 ohm et un courant d'une intensité de 0,05 ampère suffit pour donner à l'équipage mobile une déviation égale à la totalité de l'échelle.

Fig. 90. — Aimant des instruments Chauvin et Arnoux à cadre mobile.



Afin de pouvoir mesurer des courants d'intensité supérieure à 0,05 ampère, on place le circuit du cadre mobile en dérivation aux extrémités d'un shunt approprié à l'intensité du courant à mesurer (fig. 92). Ces shunts sont constitués par des feuilles de maillechort de 1 mm d'épaisseur, soigneusement soudées par

leurs extrémités à deux blocs de cuivre munis de mâchoires, auxquelles se fixent les conducteurs du circuit extérieur. La liaison entre l'ampèremètre et le shunt s'établit à l'aide de deux fils souples, de 1 m de longueur environ, dont les extrémités sont munies d'une broche conique que l'on fixe, d'un côté dans un trou réservé, à cet effet, à l'extrémité du shunt, de l'autre dans une des bornes de l'instrument. Dans ces conditions, il est impossible de se servir de conducteurs autres que ces fils souples dont l'emploi est indispensable pour effectuer les mesures

Fig. 91. — Ampèremètre Chauvin et Arnoux à cadre mobile.

avec exactitude, car leur résistance a été calculée en conséquence.

L'emploi de shunts séparés présente l'avantage de ne nécessiter qu'un seul ampèremètre pour effectuer des mesures d'intensités très différentes. Après étalonnage, chaque shunt est muni d'une plaque portant l'indication de la valeur maximum en ampères pour laquelle il a été établi et de sa résistance exprimée en microhms.



Fig. 92. — Shunt d'ampèremètre Chauvin et Arnoux à cadre mobile.

Le voltmètre ne diffère de l'ampèremètre que par la résistance donnée à l'enroulement du cadre mobile qui a toujours une valeur de 75 ohms et par l'addition de résistances disposées en série à la suite du cadre et dont la valeur est appropriée à la différence de potentiel maximum que doit mesurer l'instrument.

Un courant de 3 milliampères dans la bobine mobile suffit pour imprimer à l'aiguille indiquatrice une déviation égale à la totalité de l'échelle graduée. Comme la résistance de l'enroulement du cadre mobile n'est qu'une petite fraction de la résistance totale, on conçoit que les indications de l'instrument soient pratiquement indépendantes des variations de la température.

Dans les instruments Chauvin et Arnoux, le conducteur positif s'attache à la borne de gauche et le négatif à la borne de droite.

La faible intensité de courant qu'exigent ces voltmètres pour leur fonctionnement ainsi que la petite résistance donnée au cadre galvanométrique ont permis d'utiliser le même instrument pour mesurer des tensions très différentes. A cet effet, l'instrument est muni, sur le pour-

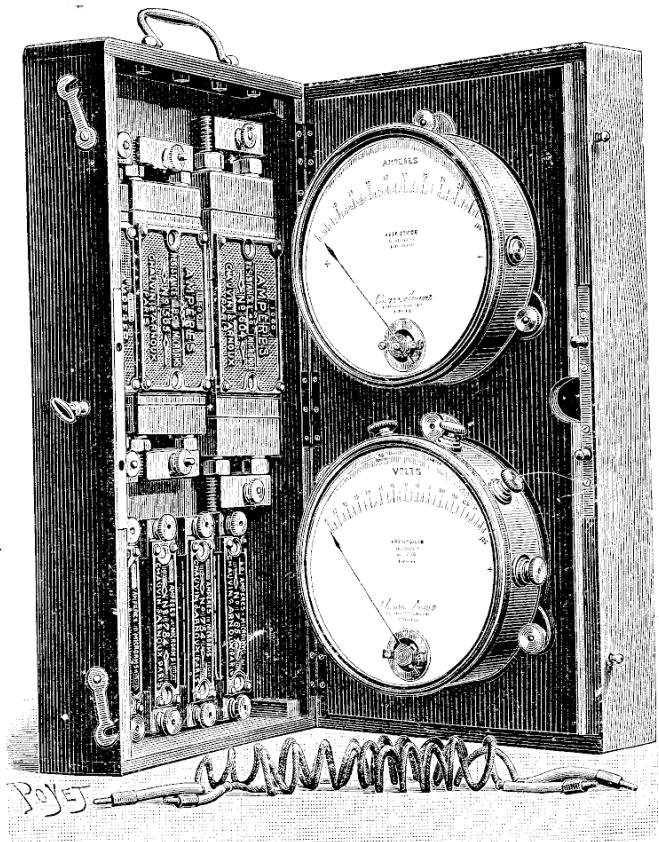


Fig. 93. — Caisse de contrôle Chauvin et Arnoux.

tour de son boîtier, de plusieurs bornes correspondant à diverses résistances additionnelles. La borne de gauche, marquée O, est commune aux divers circuits; la borne de droite correspond à la tension la plus élevée que peut mesurer l'instrument et les bornes intermédiaires à des tensions dont la valeur va en diminuant à mesure que l'on s'avance vers la gauche.

Sous le nom de caisse de contrôle, les constructeurs ont réuni dans une boîte un voltmètre et un ampèremètre avec ses shunts (fig. 93).

Le voltmètre a une graduation de 150 divisions et peut être utilisé avec cinq sensibilités différentes pour chacune desquelles on obtient le maximum de la déviation.

1 ^{er} circuit, —	3 volts —	chaque division correspond à 0,02 volt.
2 ^e —	30 —	—
3 ^e —	150 —	—
4 ^e —	500 —	—
5 ^e —	600 —	—
		0,2 —
		1 —
		2 volts
		4 —

L'instrument est muni d'un bouton commandant un interrupteur-inverseur. Lorsque l'aiguille tend à dévier en sens inverse de la graduation, il suffit de pousser le bouton à droite ou à gauche, suivant le cas, pour inverser les communications. Lorsque le bouton est arrêté au milieu de sa course, le circuit se trouve interrompu.

L'ampèremètre a un cadran comportant 100 divisions et est accompagné de sept shunts qui permettent d'obtenir le maximum de déviation pour chacune des valeurs suivantes :

1 ampère, soit 0,01 ampère par division.
6 ampères — 0,03 — —
10 — — 0,1 — —
50 — — 0,5 — —
100 — — 1 — —
500 — — 5 ampères — —
1 000 — — 10 — —

Les mêmes constructeurs ont également exposé un instrument composé d'un voltmètre et d'un ampèremètre de construction identique à ceux qui viennent d'être décrits et destinés spécialement aux voitures automobiles électriques (fig. 94).

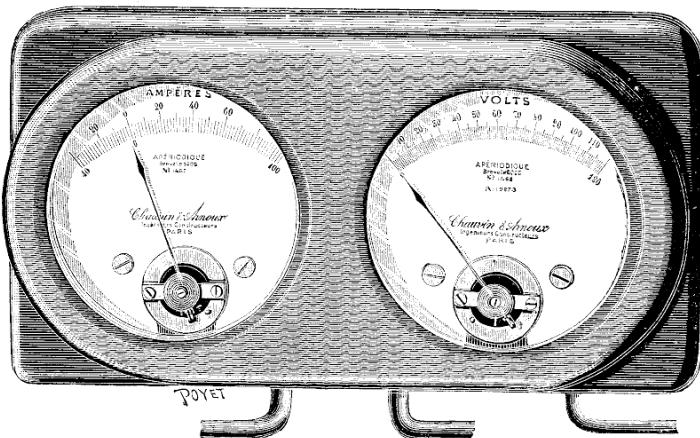


Fig. 94. — Voltmètre et ampèremètre Chauvin et Arnoux pour automobiles électriques.

Les deux instruments sont renfermés dans une boîte en noyer, parfaitement étanche. Trois câbles sortent de cette boîte ; deux sont reliés à l'ampèremètre et le troisième au voltmètre.

La graduation de l'ampèremètre est établie, si on le désire, pour indiquer la récupération de courant lorsque le moteur de la voiture fonctionne comme génératrice, lors de la descente d'une rampe. Dans ces conditions, l'instrument peut mesurer 25 ampères à gauche du zéro et 100 ampères à droite.

Le voltmètre peut également être étalonné pour que sa graduation soit utilisée pour le dernier tiers de la force électromotrice totale que peut mesurer l'instrument. Ainsi, au lieu d'indiquer de 0 à 120 volts, on peut le graduer de 80 à 120 volts ou de 100 à 150 volts.

L'ampèremètre et le voltmètre enregistreurs Chauvin et Arnoux (fig. 95) sont basés sur le même principe que les instruments qui viennent d'être décrits.

L'aimant est constitué par une seule pièce d'acier au tungstène sans pièces polaires rapportées.

Le cadre galvanométrique est formé d'un cadre de cuivre rouge, servant d'amortisseur élec-

tromagnétique, sur lequel est enroulé du fil de cuivre recouvert de soie. Ce cadre, monté sur pivots entre deux pointes engagées dans des crapaudines en pierre fine, oscille autour d'un cylindre de fer doux qui a pour objet de diminuer la réluctance du circuit magnétique constitué par l'aimant permanent.

Le courant est amené au cadre mobile par deux ressorts spiraux.

Malgré la faible valeur de la puissance électrique dépensée dans ce cadre, valeur qui ne dépasse pas 0,2 watt pour une déviation maximum de 36°, les forces en jeu sont suffisantes pour assurer l'inscription du diagramme avec un tracé donnant rigoureusement toutes les variations, grâce à la substitution à la plume ordinaire d'une plume-molette n'entravant pas d'une façon appréciable les mouvements du cadre mobile. Cette plume-molette trace un trait très délié sur le papier par *roulement* et non par *frottement* et permet de donner à l'instrument une très grande sensibilité.

Deux bras articulés sur l'aimant portent un secteur gradué dont les divisions servent à repérer la position de l'aiguille porte-plume en l'absence de papier sur le cylindre enregistreur. Ce secteur gradué permet également de se servir de l'instrument comme d'un voltmètre ou d'un ampèremètre ordinaire. Il suffit de relever ce cadran divisé pour écarter la plume du cylindre lorsqu'on veut transporter l'instrument ou placer le papier divisé destiné à recevoir le diagramme.

Un petit curseur placé sur l'aiguille permet de régler sa position avec une très grande exactitude.

Le mouvement d'horlogerie, ordinairement employé pour actionner le cylindre enregistreur, effectue un tour en vingt-quatre heures et est muni d'un échappement ordinaire à cylindre. Dans les instruments à déroulement rapide, cet échappement est remplacé par un régulateur électromagnétique. Le remplacement du papier sur le cylindre s'effectue avec la plus grande facilité grâce à un dispositif spécial. Les feuilles de papier employées sont divisées et chiffrees en heures dans le sens de leur plus grande longueur et en cinquante divisions égales, par groupes de cinq divisions, dans le sens perpendiculaire. Ces dernières divisions ne portent pas de chiffres, car l'enregistreur pouvant être employé avec des sensibilités différentes, il est toujours facile de porter ces chiffres après coup et suivant la sensibilité avec laquelle doit être obtenu le diagramme enregistré. La réalisation d'un dispositif galvanométrique comportant une graduation en divisions égales présente cet avantage que les diagrammes peuvent être intégrés à l'aide d'un planimètre, bien qu'ils soient rapportés à un système de coordonnées rectilignes et curvilignes, la courbure des ordonnées curvilignes étant telle que les surfaces des différents petits parallélogrammes, à côtés rectilignes et curvilignes deux à deux, ne diffèrent au maximum que de $\frac{1}{200}$, c'est-à-dire d'une quantité inférieure aux erreurs qu'on peut commettre d'autre part.

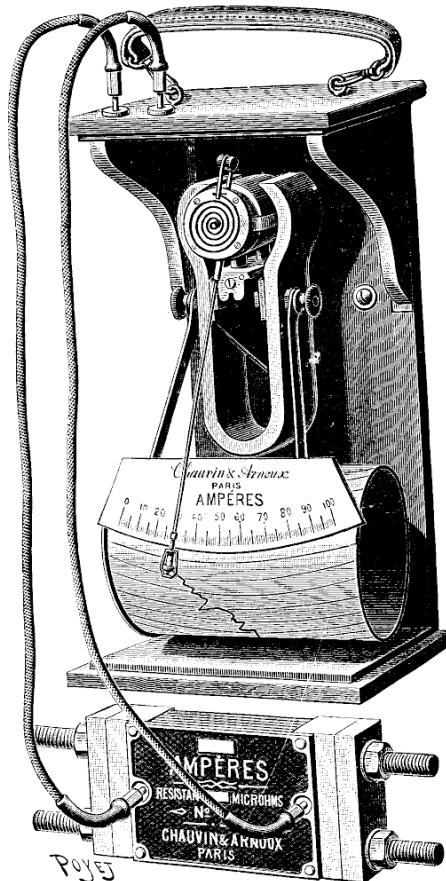


FIG. 95. — Ampèremètre enregistreur Chauvin et Arnoux.

Les ampèremètres enregistreurs sont pourvus de shunts interchangeables établis pour les différentes valeurs maxima à mesurer et qu'il suffit de substituer l'un à l'autre pour faire varier la sensibilité de l'instrument dans le rapport voulu. Ces shunts se relient à l'enregistreur par des fils souples ; la série complète comprend douze de ces shunts, correspondant aux intensités maxima de 1 ; 2,5 ; 5 ; 10 ; 25 ; 50 ; 100 ; 250 ; 500 ; 1 000 ; 2 500 et 5 000 ampères.

Les déviations de l'instrument étant proportionnelles à l'intensité du courant, le zéro de la graduation peut être placé, par un simple décalage du piton du spiral antérieur, en un point quelconque de l'échelle des ordonnées du diagramme sans qu'il soit nécessaire de procéder à un nouvel étalonnage. On peut ainsi enregistrer simultanément le sens et l'intensité d'un courant, cas qui se présente notamment lorsqu'on veut utiliser l'instrument pour enregistrer la charge et la décharge d'une batterie d'accumulateur.

AMPÈREMÈTRE ET VOLTMÈTRE DE LA COMPAGNIE GÉNÉRALE D'ÉLECTRICITÉ DE CREIL (ANCIENS ÉTABLISSEMENTS DAYDÉ ET PILLÉ). — Dans ces instruments, le cadre mobile est monté sur pivots et des spiraux en bronze phosphoreux servent pour amener le courant et produisent en même temps le couple antagoniste.

Dans les voltmètres, la résistance additionnelle est logée dans le boîtier entre les branches de l'aimant. Cette résistance peut être fractionnée lorsque le voltmètre est établi pour plusieurs sensibilités.

Dans les ampèremètres, le cadre mobile est dérivé aux bornes d'un shunt. Ces shunts ont tous la même résistance lorsqu'ils s'appliquent à des instruments pouvant mesurer la même intensité maximum ; ils sont, par conséquent, interchangeables, l'étalonnage de l'ampèremètre s'effectuant en agissant sur une petite résistance supplémentaire montée en série avec le cadre mobile.

AMPÈREMÈTRES ET VOLTMÈTRES DU LABORATOIRE VOLTA. — La maison Gaiffe a construit ces instruments, imaginés et étudiés par MM. Abdank-Abakanowicz et Meylan.

Dans les instruments de précision, dont la figure 96 montre la disposition schématique, on a cherché à rendre la bobine mobile facilement amovible. A cet effet, elle est disposée de manière à pouvoir être enlevée sans qu'il soit nécessaire de démonter le noyau de fer doux *aa*, qui sert à diminuer la réluctance du circuit magnétique de l'aimant fixe NS.

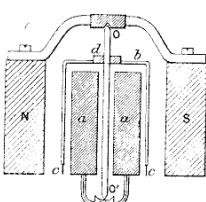


FIG. 96. — Coupe du voltmètre de précision du laboratoire Volta.

La bobine mobile *b* est enroulée et collée à la gomme-laque sur une cloche cylindrique *c* en aluminium, fixée en *d* sur l'axe *OO'* qui pivote dans des crapaudines en pierre fine.

Comme on le voit sur la figure 97, les fils de la bobine descendent verticalement suivant deux génératrices diamétrales *E''* et, à la partie inférieure de la cloche en aluminium, se recourbent en *EE'* pour suivre la courbure de cette dernière.

Dans ces conditions, la cloche peut coiffer le noyau de fer doux *aa* sans que la bobine mobile y fasse obstacle.

Pour éviter toutes déformations de la graduation, les divisions sont gravées sur un cadran métallique.

Dans ce type d'instruments, comme dans tous les instruments du même genre, la bobine mobile agit sur l'aimant, tout comme un induit de dynamo, en produisant une réaction électromagnétique ; les ampères-tours démagnétisants du cadre tendent à faire perdre à l'aimant permanent une partie de son moment magnétique. Par suite de l'affaiblissement de l'aimant, c'est-à-dire à cause de la diminution d'un des facteurs du couple produisant la déviation, l'instrument donne des indications plus faibles qu'elles ne le sont réellement.

Afin d'éviter cet inconvénient, peu sensible dans les voltmètres, mais beaucoup plus fréquent dans les ampèremètres des stations centrales qui subissent de fortes et fréquentes

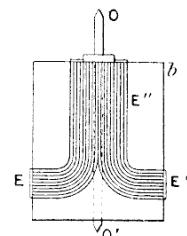


FIG. 97. — Détails de construction de la bobine mobile du voltmètre de précision du laboratoire Volta.

variations de charge, et dans ceux des usines de tramways exposés à des courts-circuits, les inventeurs ont imaginé un second type d'instruments, dans lequel la cause de dérèglement signalée est évitée en disposant l'aimant de manière qu'un seul côté du cadre mobile agisse pour produire le couple déviant.

L'aimant a ses deux branches NN' et SS' repliées suivant une courbure dont l'axe de la bobine mobile, projeté en O , constitue le centre (fig. 98). Le côté a de la bobine mobile aa' se déplace seul dans l'entrefer, qui a une largeur de 2,5 mm, largeur que l'on peut modifier et régler à l'aide d'une pièce polaire mobile b , en fer doux.

Le couple déviant est, par suite, réduit de moitié, toutes choses égales d'ailleurs; mais, par contre, la réaction due au cadre mobile tend plutôt, sinon à augmenter, du moins à maintenir constante l'aimantation de l'aimant fixe.

Le noyau de fer doux, placé d'ordinaire à l'intérieur de la bobine mobile, se trouve naturellement supprimé dans ce modèle d'instrument. Le champ dans l'entrefer a une valeur de 1 300 gauss; l'apéritivité se trouve très peu diminuée.

Pour la vérification des instruments placés sur les tableaux de distribution, le laboratoire Volta a réalisé un type de voltmètre et d'ampèremètre de construction analogue et à trois sensibilités. L'ampèremètre est muni, à cet effet, de trois shunts permettant de mesurer de 0 à 3, de 0 à 30 et de 0 à 300 ampères; dans le voltmètre, les résistances additionnelles sont calculées pour pouvoir mesurer de 0 à 3, de 0 à 150 et de 0 à 750 volts. Les fiches amenant le circuit aux différents shunts ou résistances sont de grosseur différente afin d'éviter toute erreur.

Ces instruments sont aussi construits avec système enregistreur. Dans ce cas, les dimensions de l'aimant sont plus grandes, afin d'obtenir un couple déviant atteignant 20 grammes-centimètres; ce couple puissant peut vaincre facilement les frottements de la plume sur le papier.

Le système enregistreur comporte une seconde plume fixe qui trace la ligne des zéros, afin de prévenir les erreurs dues au papier mal placé et sur lequel la ligne de repère est tracée d'avance.

Un dispositif spécial permet d'utiliser ces appareils enregistreurs sur les locomotives électriques et sur les voitures de tramways. Ce dispositif consiste en un cadre ou châssis en bois que l'on fixe directement aux parois de l'abri de la locomotive ou sur un panneau de la voiture automotrice.

L'instrument est placé au milieu du châssis et des tampons élastiques en caoutchouc, disposés suivant trois plans perpendiculaires, amortissent suffisamment les oscillations dues aux trépidations. L'instrument est ainsi maintenu de haut en bas, de gauche à droite et d'avant en arrière.

Le caoutchouc présente l'avantage sur les ressorts d'offrir une élasticité considérable, tout en n'ayant qu'une faible inertie propre.

AMPÈREMÈTRE ET VOLTMÈTRE DE L'ALLGEMEINE ELEKTRICITÄTS GESELLSCHAFT. — Cette Société exposait plusieurs modèles de voltmètres et d'ampèremètres à bobine mobile. La figure 99 montre l'aspect extérieur d'un millivoltmètre de précision et la figure 100 celui d'un ampèremètre pour tableau de distribution.

Dans les voltmètres, on cherche à rendre pratiquement négligeables les corrections nécessitées par les variations de température en bobinant le cadre mobile avec du fil de cuivre et en établissant la résistance additionnelle en maillechort ou en autre métal de résistivité constante avec la température dans les limites de la pratique. La résistance du cadre mobile étant excessivement faible par rapport à celle de la résistance additionnelle, la résistance totale ne varie que d'une façon négligeable. On peut, du reste, tenir compte des variations de la

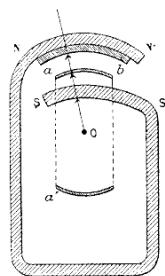


FIG. 98. — Ampèremètre à cadre mobile non démagétisant du laboratoire Volta.

température en faisant subir aux lectures une correction; dans ce cas, l'instrument est muni d'un thermomètre (fig. 99) et est accompagné d'une table de correction.

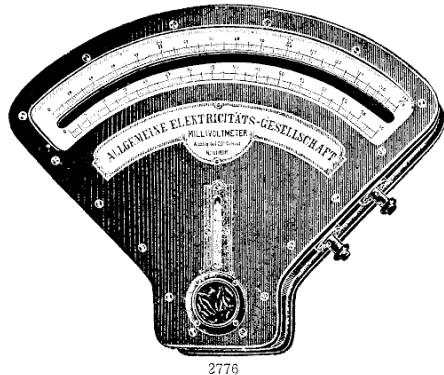


FIG. 99. — Millivoltmètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

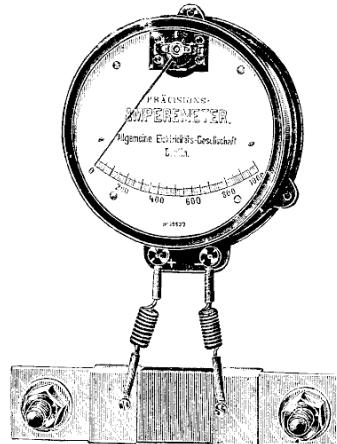


FIG. 100. — Ampèremètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

AMPÈREMÈTRE ET VOLTMÈTRE HARTMANN ET BRAUN. — Ces instruments (fig. 101) ont été spécialement étudiés pour les tableaux de distribution.

Le boîtier est en fonte et le couvercle ne laisse visibles que la graduation et l'extrémité de l'aiguille indicatrice.

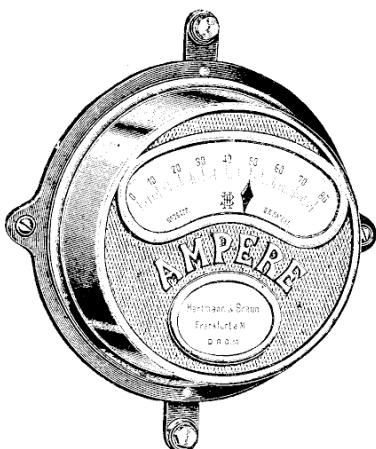


FIG. 101. — Ampèremètre à bobine mobile Hartmann et Braun.

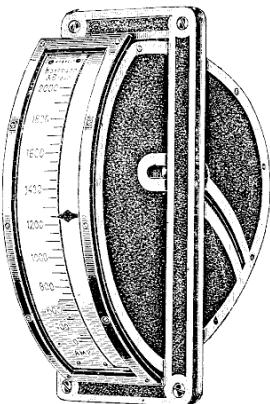


FIG. 102. — Ampèremètre à bobine mobile Hartmann et Braun avec graduation sur le côté.

Ce boîtier en fonte, dont l'épaisseur est assez forte, a pour objet de mettre l'instrument à l'abri des perturbations causées par le voisinage de champs magnétiques très puissants. Dans ces conditions, ces instruments peuvent être utilisés à proximité de dynamos en charge.

Un autre modèle des mêmes constructeurs (fig. 102) est disposé pour occuper le moins de largeur possible sur les tableaux de distribution. Le boîtier est monté à charnière et peut pivoter dans un cadre autour du petit côté inférieur de ce cadre. On peut ainsi régler l'inclinaison de l'instrument pour rendre toujours facile l'observation de l'aiguille.

AMPÈREMÈTRES ET VOLTMÈTRES SIEMENS ET HALSKE. — Indépendamment de plusieurs modèles d'ampèremètres et de voltmètres de précision à cadre mobile, de construction analogue à ceux décrits précédemment, la Société Siemens et Halske exposait un millivoltmètre et milliampèremètre de précision, en un seul instrument (*fig. 103*), dont la bobine mobile a 1 ohm de résistance, avec échelle absolument proportionnelle de 150 divisions et presque apériodique.

Cet instrument permet de mesurer directement des intensités de 0 à 0,45 ampère et des tensions de 0 à 0,15 volt.

Il comporte un certain nombre d'accessoires permettant d'effectuer les mesures dans des limites plus étendues et qui sont les suivantes :

1^o Boîte de résistances en manganin de 9,99 et 999 ohms pour mesurer des tensions allant jusqu'à 1,5, 15 et 150 volts (*fig. 104*);

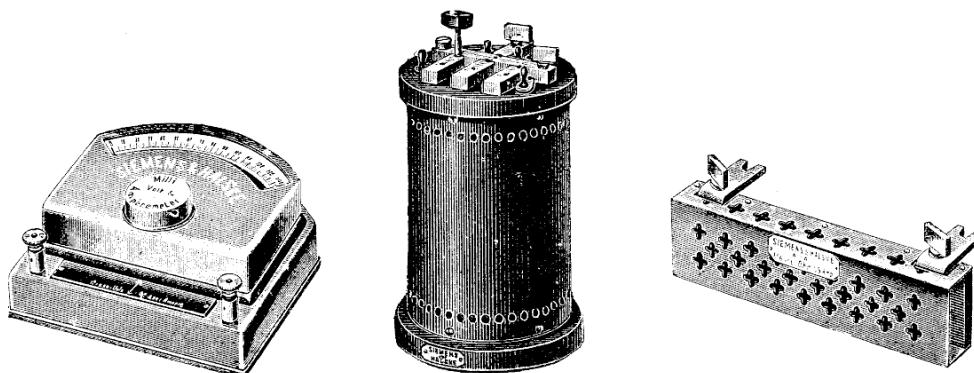


FIG. 103.
Millivoltmètre et milliampèremètre
Siemens et Halske.

FIG. 104.
Boîte de résistances pour millivoltmètre
Siemens et Halske.

FIG. 105.
Shunt pour milliampèremètre
Siemens et Halske.

2^o Boîte de résistances en manganin de 9,99, 999 et 1 999 ohms pour tensions jusqu'à 1,5, 15, 150 et 300 volts;

3^o Boîte de résistances en manganin de 9,99, 999 et 4 999 ohms, pour tensions jusqu'à 1,5, 15, 150 et 750 volts;

4^o Boîte de résistances en manganin de 9,99, 999 et 9 999 ohms pour tensions jusqu'à 1,5, 15, 150 et 4 500 volts;

5^o Des shunts de 1/9 ohm de résistance, pour mesurer des intensités allant jusqu'à 1,5 ampère (*fig. 105*);

6^o Enfin une série de shunts de 1/19, 1/49, 1/99, 1/199, 1/499, 1/999, 1/1 999 et 1/4 999 pour mesurer des intensités allant respectivement jusqu'à 3,7, 5, 15, 30, 75, 150, 300 et 750 ampères.

Le même instrument se construit aussi avec un dispositif enregistreur mû par l'électricité.

D'autres modèles d'ampèremètres et de voltmètres de précision à plusieurs sensibilités, pour laboratoires, ainsi que des modèles de poche, étaient exposés par la même Société.

VOLTMÈTRES DE PRÉCISION LORD KELVIN. — Ces instruments (*fig. 106*) à aimant fixe et à cadre mobile, présentent cette particularité qu'avant d'être étalonnés l'aimant subit une préparation spéciale qui rend les indications invariables, même longtemps après l'étalonnage. Le constructeur, M. James White, de Glasgow, établit deux modèles de ces voltmètres : l'un à cadran sur la face antérieure ; l'autre à cadran sur le côté (*fig. 107*).

Ces voltmètres ont leur bobine mobile suspendue par des ressorts spiraux qui lui amènent le courant et produisent en même temps le couple antagoniste. Les pivots sont ainsi complètement supprimés, ce qui présente l'avantage d'éviter les frottements qui en résultent et aussi toute cause de dérangement due à des pivots faussés. Malgré l'absence de pivots, le centrage de la bobine mobile est néanmoins parfaitement assuré.

Lorsque l'aiguille est au zéro, elle vient buter contre un ressort très flexible (fig. 106); grâce à cette disposition, l'aiguille se trouve suffisamment bloquée, lorsqu'on transporte l'instrument,

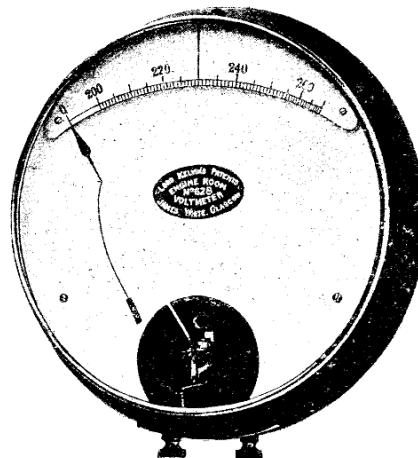


Fig. 106. — Voltmètre de précision lord Kelvin, modèle ordinaire.

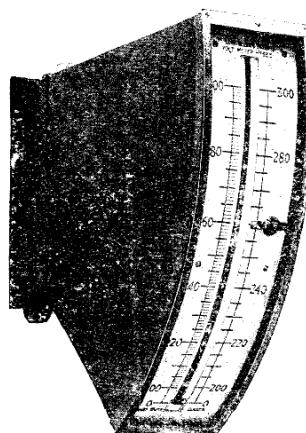


Fig. 107. — Voltmètre de précision lord Kelvin, modèle avec graduation sur le côté.

le ressort empêchant l'aiguille d'aller vers la gauche et la torsion des spiraux limitant son déplacement vers la droite.

AMPÈREMÈTRE ET VOLTMÈTRE CARON. — Ces instruments, construits et exposés par la Société industrielle des Téléphones, diffèrent des instruments analogues à bobine mobile par la substitution d'un électro-aimant à l'aimant fixe, dispositif qui a pour objet de permettre d'utiliser les instruments genre Deprez-d'Arsonval pour la mesure des courants alternatifs.

Comme on le voit sur la figure 108, l'instrument se compose de deux électro-aimants en fer à cheval F, F', dont le noyau est en tôles minces et isolées entre elles et dont les bobines B, B' sont traversées par le courant à mesurer.

Entre les pièces polaires se meut, parallèlement à son plan, un cadre très plat C en fil fin, supporté par une chape en aluminium mobile autour de l'axe D. Cette chape est munie, à sa partie inférieure, d'une tige DO, le long de laquelle peut se déplacer le contre-poids P.

Le courant, traversant les bobines et le cadre, tend à faire dévier ce dernier; la pointe O peut ainsi décrire un arc de cercle autour de l'axe D.

Le champ étant très sensiblement uniforme dans l'entrefer des électro-aimants, la déviation de la bobine est proportionnelle à l'intensité du courant dans les ampèremètres, à la différence de potentiel appliquée dans les voltmètres.

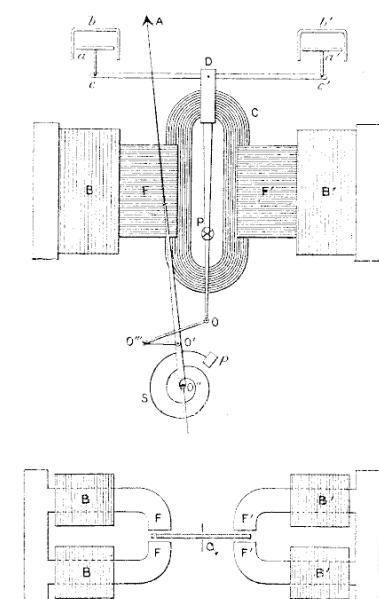


Fig. 108 et 109. — Détails de construction de l'ampèremètre Caron.

Le déplacement de la pointe O est amplifié au moyen de deux bielles O O'', O'' O', l'articulation O' s'effectuant sur l'aiguille indicatrice AO''. Un petit ressort spiral S sert à fixer le zéro de l'instrument et à annuler l'effet des temps perdus dans les articulations des bielles.

Ces instruments sont rendus sensiblement apériodiques par l'emploi d'amortisseurs à air, constitués par des cloches b , b' , dans lesquelles se déplacent sans frottement les pistons a , a' , fixés d'une manière rigide sur la tige DO par l'intermédiaire d'une traverse cc' .

Le réglage de l'instrument s'effectue en déplaçant convenablement le contrepoids P. Il est nécessaire que l'instrument soit fixé dans une position parfaitement verticale et, pour mettre l'aiguille au zéro, on agit sur le piton p du ressort spiral en manœuvrant des vis de rappel placées en dehors du boîtier.

Le voltmètre ne diffère de l'ampèremètre que par la résistance donnée aux bobines; les bobines de l'électro-aimant et la bobine mobile sont reliées en série.

L'enroulement des bobines de l'électro-aimant des voltmètres est fait en fil de mallechort afin de donner la prépondérance au facteur *résistance ohmique* dans le terme *impédance* de l'enroulement. Le décalage entre la tension et l'intensité du courant est ainsi réduit autant qu'il est possible et les indications de l'instrument sont sensiblement indépendantes de la fréquence.

En plaçant dans le voltmètre un tout petit transformateur dont le primaire est branché en dérivation sur les bornes de l'instrument et dont le secondaire est dérivé sur la bobine mobile, on arrive à rendre les indications tout à fait indépendantes de la fréquence. Il est nécessaire, pour obtenir ce résultat, que le primaire du petit transformateur ait une très grande résistance ohmique. Dans ces conditions, la tension dans le secondaire augmente alors un peu avec la fréquence; cette action complémentaire compense le retard qui est la conséquence d'une augmentation de fréquence.

Les voltmètres destinés à fonctionner sur des circuits à haute tension sont branchés sur le secondaire d'un petit transformateur réducteur.

Les ampèremètres pour courants de haute ou de basse tension et pour toutes intensités sont toujours accompagnés d'un petit transformateur dont le primaire, branché en série sur les conducteurs de la canalisation, ne comporte qu'une seule spire. Le secondaire a toujours une très grande résistance ohmique.

Les instruments Caron ne sont pas influencés par les champs magnétiques extérieurs, ni par les effets d'hystérésis; leurs indications sont indépendantes des variations de fréquence et de température. Ils n'ont pas été étudiés pour être utilisés sur les circuits à courant continu.

INSTRUMENTS DE DIVERS CONSTRUCTEURS. — Indépendamment des instruments qui viennent d'être décrits, il convient de citer ceux qui étaient exposés par diverses maisons et qui ne diffèrent des types précédents que par des détails de construction.

Des voltmètres et des ampèremètres à bobine mobile, du genre Deprez-d'Arsonval, étaient exposés par MM. Crompton et C^{ie}, de Londres; Keyser-Schmidt, de Berlin; la Norton Electrical Instrument C^o, de Manchester (États-Unis); la Eldridge Manufacturing C^o, de Springfield (États-Unis), etc.

INSTRUMENTS A INDUCTION

Ampèremètre et voltmètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft. — Ces instruments, destinés spécialement à la mesure des courants alternatifs, sont basés sur le principe des réactions produites par un flux variable s'exerçant entre des pièces métalliques fixes et mobiles convenablement disposées.

En principe, l'axe A (fig. 110) qui porte l'aiguille indicatrice est muni d'un léger disque en aluminium ou en cuivre rouge, susceptible de tourner dans l'étroit entrefer d'un électro-aimant M excité par un courant alternatif. Des écrans T, T, de forme convenable et faisant corps avec l'électro-aimant M, entourent partiellement le disque A, de telle sorte que le flux traverse ce disque directement sur une des parties de sa surface et agit ailleurs sur les écrans. Le flux produit par l'électro-aimant M, traversant directement une portion du disque A, produit dans ce dernier des courants de Foucault. Les écrans T, T, également en cuivre, sont aussi le siège de courants d'induction de même sens que ceux développés dans le disque. Il en résulte un couple qui s'exerce, dans le sens de la flèche, entre le disque mobile et les écrans fixes.

A ce couple moteur, il suffit d'opposer un couple résistant opposé au premier et produit, par exemple, par la torsion d'un ressort pour pouvoir mesurer l'effort développé entre le disque mobile et les écrans et obtenir ainsi une mesure des courants excitant l'électro-aimant M. Le circuit magnétique de ce dernier est naturellement constitué par des feuilles de tôle isolées afin de ne donner lieu qu'à des pertes par hystéresis.

Les ampèremètres et les voltmètres à induction ne diffèrent entre eux que par la résistance donnée à la bobine de l'électro-aimant M.

Les bords du disque mobile sont placés entre les branches d'un aimant permanent afin de rendre ses mouvements apériodiques.

Les instruments à induction électro-magnétique présentent deux avantages importants au point de vue de la mesure des courants alternatifs :

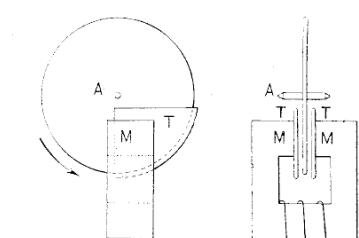


Fig. 110. — Principe des instruments à induction.

les écrans ont la même forme ; par suite, les indications données par ces instruments sont indépendantes de la forme des courbes de courant ;

2° Les courants induits dans le disque mobile et dans les écrans sont toujours de même phase. Il s'ensuit que les indications données sont indépendantes du coefficient de self-induction de la bobine de l'électro-aimant M et ne dépendent que de la valeur de la réactance de cette bobine. Dans ces conditions, les résistances non inductives que l'on est dans l'obligation d'employer pour constituer les bobines à fil fin des voltmètres peuvent être remplacées par des bobines inductives beaucoup moins coûteuses.

Les instruments à induction ne peuvent, toutefois, être utilisés que pour mesurer des courants de même fréquence que ceux qui ont servi à l'étalonnage.

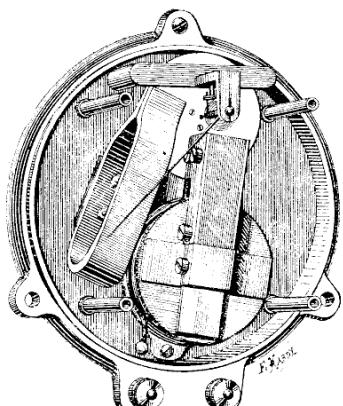


Fig. 111. — Vue intérieure d'un voltmètre à induction de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.



Fig. 112. — Voltmètre à induction de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

Les figures 111 et 112 montrent respectivement l'aspect extérieur et l'intérieur du voltmètre à induction. Les écrans ne dépassent pas les pôles de l'électro-aimant M, comme on le voit en T sur la figure 110; afin d'éviter que le bord de droite des pôles de M n'agisse sur le disque mobile et ne contre-balance en partie l'effet exercé par le bord de gauche, les écrans sont retroussés et masquent les pôles de M sur la partie de droite.

Ces voltmètres se construisent pour différentes tensions jusqu'à 1 000 volts. Pour mesurer des tensions plus élevées, on utilise les mêmes instruments en y adjoignant un petit transformateur réducteur de tension (fig. 113). Dans ces conditions, le voltmètre n'est jamais relié directement avec le circuit à haute tension.

Lorsque les ampèremètres doivent être branchés sur des circuits à haute tension, on utilise, comme pour les voltmètres, un transformateur (fig. 113) dont l'enroulement à haute tension est très soigneusement isolé. L'ampèremètre est branché sur le circuit secondaire, comme le montre la figure 114.

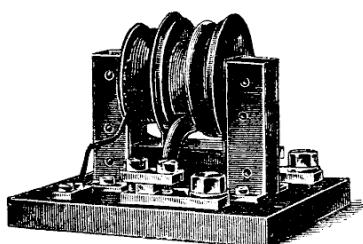


Fig. 113.
Transformateur de tension.

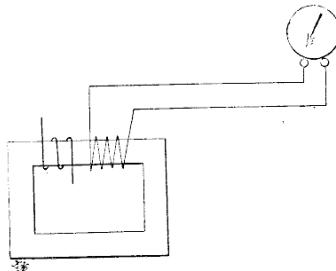


Fig. 114.
Montage d'un ampèremètre avec son transformateur.

Les ampèremètres utilisés sur des circuits à basse tension peuvent également être munis de transformateurs spéciaux lorsqu'on a à mesurer de grandes intensités. On n'a plus alors l'obligation de dévier les conducteurs de grande section pour les faire passer par le tableau de

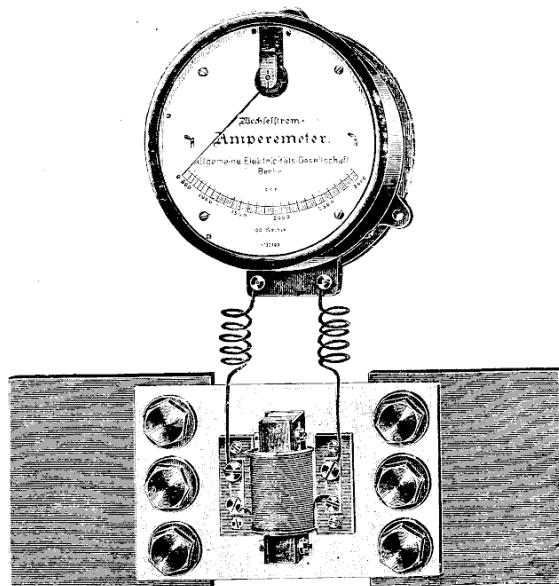


Fig. 115. — Ampèremètre à induction de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft avec son transformateur.

distribution. La figure 115 montre le dispositif de montage employé dans ce cas. Le transformateur de l'ampèremètre est directement intercalé sur les conducteurs principaux, et l'ampèremètre peut alors être placé à une certaine distance.

L'ampèremètre avec transformateur est également d'un emploi très commode, lorsqu'on veut utiliser le même instrument sur plusieurs circuits sans avoir à les ouvrir pour l'intercaler. On évite ainsi d'installer des commutateurs spéciaux et il suffit de placer un transformateur sur chaque circuit; l'unique ampèremètre se branche successivement sur les divers enroulements

secondaires des transformateurs, à l'aide d'un simple commutateur. La figure 116 montre ce dispositif pour deux circuits.

On obtient ainsi des mesures comparatives très exactes, résultat difficile à obtenir avec plusieurs instruments dont les indications sont rarement concordantes.

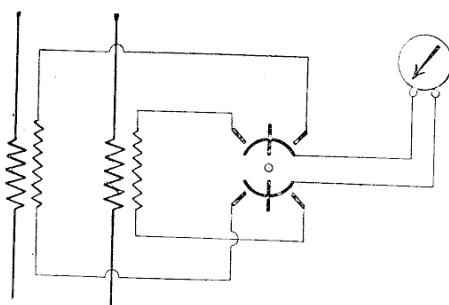


FIG. 116. — Montage d'un ampèremètre à induction desservant deux circuits.

trouve un cylindre *c* en fer doux destiné à diminuer la réluctance des circuits magnétiques des électro-aimants.

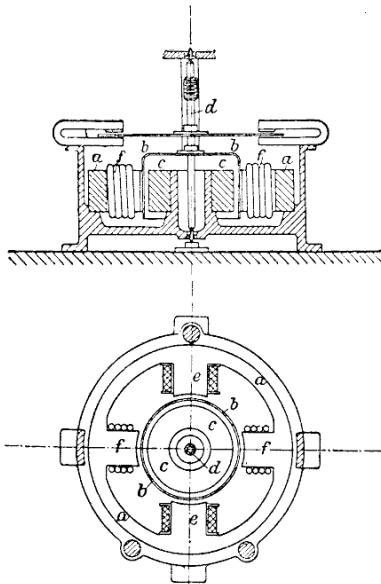


FIG. 117. — Détails de construction des ampèremètres et voltmètres Ferraris.

Les instruments à induction ne sont naturellement utilisables que pour la mesure des courants alternatifs.

Ampèremètre et voltmètre Ferraris. —

Ces instruments, construits et exposés par la Société Siemens et Halske, de Berlin, se composent, comme on le voit sur la figure 117, d'un léger tambour en aluminium *bb*, en forme de cloche, dont les bords pénètrent dans les entrefers de deux systèmes d'électro-aimants *ee*, *ff*. A l'intérieur de la cloche, on

Il se produit, par suite, un champ tournant qui

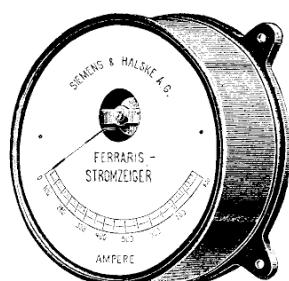


FIG. 118. — Ampèremètre Ferraris.

tend à entraîner la cloche en aluminium retenue par un ressort spiral formant le couple antagoniste.

La déviation est fonction de l'intensité ou de la tension du courant qui circule dans les bobines *f*, *f* et qui induit des courants de phases différentes dans les électro-aimants *e*, *e*.

L'apéridicité est obtenue par un frein électromagnétique constitué par un disque d'aluminium calé sur l'axe *d* et mobile entre les branches d'aimants permanents.

La figure 118 montre l'aspect extérieur des instruments Ferraris.

INSTRUMENTS THERMIQUES

Ampèremètres et voltmètres Hartmann et Braun. — L'ampèremètre et le voltmètre thermiques construits par la maison Hartmann et Braun, de Francfort, comportent un fil en alliage de platine et d'argent de 0,6 mm de diamètre et d'une longueur de 16 cm, maintenu à ses deux extrémités par des attaches fixées sur une platine (fig. 119).

A ce fil est fixé, vers son milieu, un autre fil en laiton disposé normalement ; ce second fil, de 10 cm de longueur et de 0,5 mm de diamètre, a son extrémité libre fixée par une vis.

Du milieu du fil de laiton part un fil de cocon qui, tendu sur une petite poulie montée sur un axe mobile, est fixé, d'autre part, à un ressort-lame, grâce auquel tous les fils sont maintenus tendus.

Toutes les bornes de serrage sont isolées de la platine qui les supporte. Les deux bornes de serrage qui maintiennent les extrémités du fil de platine-argent sont reliées respectivement aux bornes d'entrée et de sortie du courant, de sorte que le courant à mesurer ne traverse uniquement que ce fil.

A la poulie mobile, dont les extrémités de l'axe, taillées en pointe, pivotent dans des trous garnis de rubis, est adaptée une aiguille indicatrice qui se déplace devant un cadran dont la graduation est tracée empiriquement.

Ce mécanisme fonctionne de la manière suivante : Lorsque le courant traverse l'instrument, le fil de platine-argent s'allonge et s'infléchit ; par suite, la distance des points d'attache du fil de laiton diminue et ce dernier s'infléchit aussi, de sorte que le fil de cocon allant du milieu du fil de laiton à la poulie est sollicité par le ressort-lame et s'enroule, imprimant ainsi à la poulie un mouvement de rotation. Ce mouvement de rotation permet de mesurer l'intensité ou la tension du courant passant dans l'instrument. Le dispositif qui vient d'être décrit amplifie considérablement les augmentations de longueur du fil de platine-argent.

Pour rendre les indications de l'instrument indépendantes de l'influence de la température extérieure, la platine qui sert de support au fil dilatable est formée, entre les deux bornes d'attache, partie en laiton, partie en fer, en proportions convenables. Grâce à cette disposition, la platine a le même coefficient de dilatation que le fil. En outre, la masse de cette platine est réduite au minimum, afin que l'état d'équilibre thermique se produise rapidement.

L'une des bornes d'attache du fil dilatable est disposée de manière que l'on puisse la déplacer à l'aide d'une vis, afin de pouvoir, au besoin, ramener l'aiguille indicatrice au zéro de la graduation.

Pour obtenir une apérioridicité aussi parfaite que possible, l'axe supportant l'aiguille est muni d'un léger disque en aluminium qui se meut entre les pôles d'un puissant aimant permanent.

La sensibilité de ces instruments est plus grande vers la fin de la graduation qu'au commencement, l'énergie dépensée dans le fil dilatable (RI^2) augmentant proportionnellement au carré de l'intensité.

Le fil de platine-argent est disposé horizontalement afin de lui communiquer, en tous ses points, la même température que celle qu'accuse la platine lui servant de support. Si le fil était disposé verticalement, on n'obtiendrait pas le même résultat, étant donné que l'instrument s'échauffe davantage à sa partie supérieure.

Dans les ampèremètres, le fil dilatable est monté en dérivation aux bornes d'un shunt traversé par le courant à mesurer. La perte de tension dans l'instrument varie de 0,2 à 0,3 volt.

Dans les voltmètres, le fil dilatable a une résistance de 14,5 ohms. L'intensité de courant nécessaire pour obtenir le fonctionnement de l'instrument est d'environ 0,21 ampère. Il en résulte que ce voltmètre peut être utilisé pour mesurer des différences de potentiel très faibles,

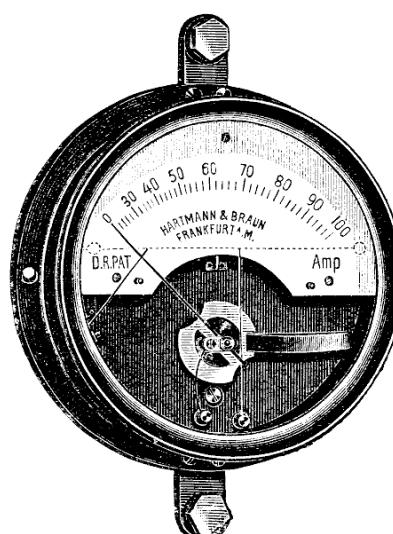


Fig. 119. — Ampèremètre thermique Hartmann et Braun.

au-dessous de 3 volts. Lorsqu'un voltmètre doit donner la déviation maximum pour des différences de potentiel inférieures à 3 volts, on fait passer le courant à travers le fil de laiton, mis en communication avec l'une des bornes, et on relie les deux extrémités du fil platine-argent à l'autre borne; la résistance se trouve ainsi réduite au quart. Pour des tensions supérieures à 3 volts, on ajoute des résistances en constantan qui sont montées en série avec le fil de platine-argent et que l'on dispose au fond du boîtier de l'instrument. Comme le fil de platine argent a un coefficient de température faible et la résistance en constantan un coefficient nul, que, par suite, le rapport entre les deux est grand, la résistance totale du voltmètre et aussi ses indications sont indépendantes de la température extérieure.

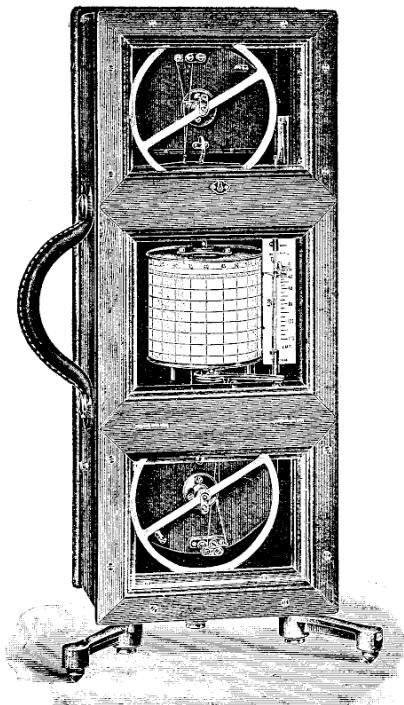


FIG. 120. — Ampèremètre thermique enregistreur Hartmann et Braun.

Cet instrument est facilement transportable et, dans la boîte vitrée qui sert à le renfermer, se rangent les trois pieds servant de support que l'on met en place lorsqu'on veut se servir de l'ampèremètre.

Ampèremètre et voltmètre Chauvin et Arnoux. — Les ampèremètres et voltmètres thermiques Chauvin et Arnoux (fig. 121) comportent les organes suivants :

- 1° Un fil dilatable en cuivre de 8 à 10 cm de longueur seulement;
- 2° Un dispositif amplificateur de la dilatation du fil ;
- 3° Un dispositif de compensation de la température extérieure.

Pour amplifier la dilatation du fil échauffé par le passage du courant, on a utilisé la propriété suivante des triangles :

Soit un triangle AFB (fig. 122) dont l'angle F est très sensiblement égal à π . On a, dans ces conditions :

$$f^2 = a^2 + b^2 - 2 ab \cos F;$$

d'où, en différenciant, on obtient :

$$fdf = ab \sin F d F,$$

c'est-à-dire :

$$\frac{dF}{df} = \frac{f}{ab \sin F},$$

relation qui montre que la variation dF de l'angle F pour un allongement df du côté f est maximum, en faisant F très voisin de 180° et b le plus petit possible.

On pourrait aussi faire l'angle F très voisin de zéro.

En réalité, le côté b est constitué par le rayon d'un petit cylindre sur lequel le fil dilatable est fixé par une de ses extrémités.

Avec ce dispositif, on a pu obtenir une déviation de 90° avec une consommation d'énergie de 0,35 watt seulement dans le fil dilatable, ce qui correspond, dans l'ampèremètre, à un courant

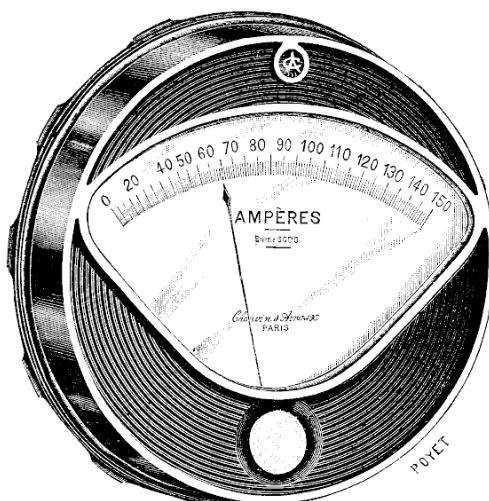


Fig. 121. — Ampèremètre thermique Chauvin et Arnoux.

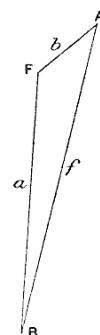


Fig. 122. — Principe des instruments thermiques Chauvin et Arnoux.

de 3,3 ampères sous 0,1 volt, alors que, dans les instruments similaires, il faut 0,4 volt pour obtenir la même sensibilité.

Le dispositif compensateur de la température ambiante consiste à fixer parallèlement au fil dilatable un faisceau de fils identiques et à tendre le tout à l'aide d'un fort ressort en acier. On obtient ainsi la fixité du zéro, l'action de la température agissant également et en même temps sur tous les fils.

Le fil dilatable f s'attache, d'une part, à un axe dont le centre est en F et, d'autre part, à une pince B . La distance BF est invariable et le point B se déplace suivant l'allongement du fil. Le point B actionne l'aiguille indicatrice de l'instrument par l'intermédiaire d'un dispositif amplificateur mécanique. Les fils de compensation, de même métal que le fil dilatable, sont tendus parallèlement à ce dernier et viennent s'attacher à la même pince B .

Le voltmètre thermique ne diffère de l'ampèremètre qu'en ce que le fil dilatable qui, dans ce dernier, est dérivé aux bornes d'un shunt, se trouve, dans le voltmètre, monté en série avec une résistance non inductive de valeur appropriée.

Une vis spéciale permet de ramener l'aiguille indicatrice au zéro si, par suite d'accident, elle s'était déplacée.

Voltmètres Richard. — Les voltmètres thermiques exposés par M. J. Richard, de Paris, sont de deux types : à cadran et à enregistreur. Dans le but de supprimer les dispositifs amplificateurs de dilatation du fil, à cause de la délicatesse de ces organes, M. J. Richard emploie, comme fil dilatable un fil fin d'une certaine longueur.

Grâce à une série de cinq poulies de renvoi, cette longueur de fil peut se loger dans une boîte de 48 cm de diamètre extérieur.

Le fil traversé par le courant est d'un alliage spécial dont la résistivité est pratiquement constante, malgré les variations de température.

Il est monté dans le boîtier, comme le montre la figure 123, qui représente en plan et en coupe l'intérieur de l'instrument. Le fil est fixé, d'une part, en A, à un système compensateur B, qui a pour effet de rendre les indications de l'appareil indépendantes de la température ambiante.

Ce compensateur est constitué par un ensemble de deux métaux, dont les coefficients de dilatation sont très différents et qui ne sont autres que le zinc et l'acier-nickel connu sous le nom d'acier Guillaume.

Du point A, le fil passe successivement dans les gorges de petites poulies en ivoire P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , P_5 , montées sur pointes, et aboutit à l'extrémité du petit bras d'un levier C. Au grand bras de ce levier s'attache un autre fil, inactif, qui, après avoir fait un tour sur le tambour T, calé sur l'axe de l'aiguille E, vient se souder à l'extrémité D d'un ressort R destiné à maintenir l'ensemble dilatable constamment tendu.

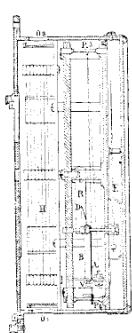


Fig. 123. — Détails de construction du voltmètre thermique Richard.

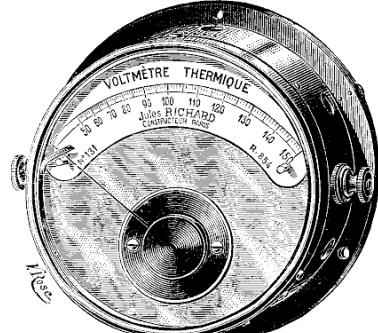
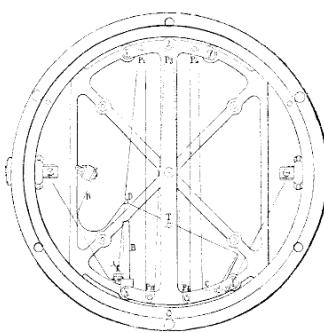


Fig. 124. — Voltmètre thermique Richard.

On amène l'aiguille au zéro de la graduation en agissant sur une vis V qui fait varier la position du compensateur B.

On accède à cette vis par une fenêtre pratiquée sur le pourtour du boîtier, cette fenêtre étant normalement fermée par une petite porte.

Le fil dilatable est monté en série avec un rhéostat H, établi avec un fil identique au fil dilatable. Ce rhéostat n'a pas de self-induction et sa résistance est réglée d'après la tension maximum que doit supporter le voltmètre.

L'ensemble du mécanisme est disposé sur un châssis métallique évidé sur lequel se place le boîtier en tôle oxydée.

Le rhéostat est placé dans ce boîtier muni de plusieurs ouvertures destinées à assurer un bon refroidissement.

Chaque ouverture est munie d'une chicane qui, sans gêner la circulation de l'air, empêche l'introduction de corps étrangers dans l'instrument. Ces voltmètres sont très sensibles et particulièrement apériodiques. Le zéro présente une grande stabilité et le fil dilatable peut être facilement remplacé en cas d'accident.

La figure 124 montre l'aspect d'ensemble des voltmètres thermiques à cadran. Les divers modèles ne diffèrent que par la graduation ; chaque modèle peut donner des indications dans les limites ci-après :

20 à 60 volts.
50 à 130 —
80 à 230 —

100 à 300 volts.
200 à 600 —
200 à 700 —

300 à 1 000 volts.
800 à 2 000 —
1 000 à 3 000 —

Le rhéostat est indépendant du boîtier à partir du modèle de 200 à 600 volts jusqu'à celui de 300 à 1 000 volts. Pour les voltmètres destinés à mesurer des tensions plus élevées, le rhéostat est remplacé par un petit transformateur réducteur de tension, ces derniers voltmètres étant exclusivement employés pour mesurer des tensions alternatives.

Dans le modèle enregistreur que représente la figure 125, l'aiguille est remplacée par un style d'aluminium terminé par une plume qui trace le diagramme sur un cylindre enregistreur à axe horizontal, faisant généralement un tour par 24 heures.

Les feuilles de ces enregistreurs donnent le volt par division pour le modèle de 60 à 150 volts. Dans le type de 120 à 300 volts, chaque division correspond à 2 volts et respectivement à 3 et 4 volts pour les types de 180 à 450 volts et de 240 à 600 volts.

Les dimensions d'encombrement du voltmètre thermique enregistreur sont : longueur 21 cm, hauteur 37 cm, profondeur 20 cm.

Ampèremètre et voltmètre Olivetti. — Dans les ampèremètres thermiques, la dépense d'énergie est plus grande que dans les instruments du genre Deprez-d'Arsonval utilisés avec un shunt. C'est pour éviter cet inconvénient que M. Olivetti, d'Ivrea (Italie), a réalisé un nouveau modèle d'instrument thermique.

Le dispositif qu'il a employé est caractérisé par la diminution de la résistance du shunt et par le procédé d'amplification de la dilatation du fil traversé par le courant.

Dans l'ampèremètre, le fil thermique a une longueur de 10 à 12 cm et son diamètre est de 0,4 mm ; il est constitué par un alliage formé de 2 parties d'argent et d'une partie de platine. Cet alliage a une résistance spécifique de 32 microhms : centimètre, un coefficient de température qui est seulement de 0,00026 et un coefficient de dilatation linéaire atteignant 0,00015 ; il a, de plus, la propriété d'être inoxydable et d'avoir un point de fusion excessivement élevé ; enfin, sa résistance à la rupture est très grande, puisqu'un fil de 0,3 mm de diamètre ne se rompt que sous un effort de traction de 35 kg par millimètre carré de section.

La figure 126 montre schématiquement le moyen ingénieux employé par M. Olivetti pour réduire la consommation d'énergie dans le shunt de l'instrument. Le fil dilatable AB n'est pas simplement relié en dérivation, par ses extrémités A et B, aux bornes MN du shunt ; la borne M est reliée par les trois points A, D et B avec le fil dilatable et la borne N, par les deux points C et E. Les connexions bB , dD , aA , Ee , Cc sont établies par des lames très souples en argent soudées sur le fil AB et sur les barres Ma et Ne , qui ont une résistance négligeable.

Si u est la chute de tension aux bornes du shunt MN, lorsque l'intensité du courant a une valeur I , si le fil AB, de résistance r , était branché entre MN, comme d'ordinaire, la consomma-

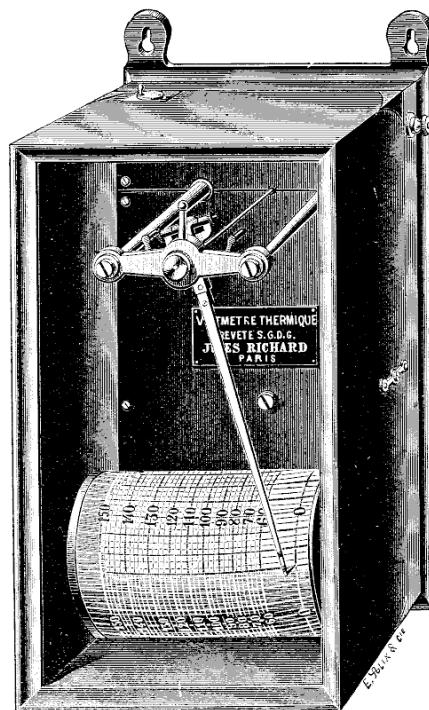


FIG. 123. — Voltmètre thermique enregistreur J. Richard.

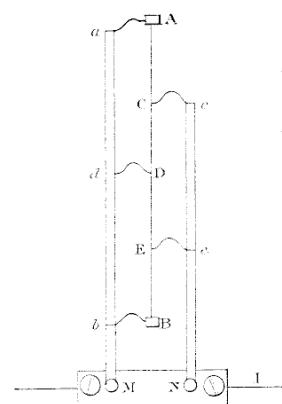


FIG. 126. — Ampéremètre thermique Olivetti.

tion d'énergie électrique serait $\frac{u^2}{r}$. Avec le dispositif employé par M. Olivetti, la résistance réduite des quatre parties du fil n'a plus pour valeur que $\frac{r}{16}$ et la quantité d'énergie dépensée dans le fil devient $\frac{16u^2}{r}$. Il est donc possible de diminuer d'une manière très notable la valeur de u , c'est-à-dire la quantité d'énergie absorbée dans le shunt, tout en conservant à l'instrument la même sensibilité, autrement dit en dépensant dans le fil dilatable la même quantité de chaleur.

La résistance du shunt doit être pratiquement indépendante de sa température, afin que la chute de tension u à ses bornes soit proportionnelle à l'intensité du courant qui le traverse. Il est donc nécessaire que ce shunt, comme le fil dilatable, soit fait avec un métal ayant un coefficient de température très faible.

Le dispositif employé par M. Olivetti pour amplifier la dilatation du fil thermique est le suivant (fig. 127) : le fil est attaché en P à une pince fixe et son extrémité opposée est soudée en F sur le levier OM tout près du point d'articulation O de ce levier.

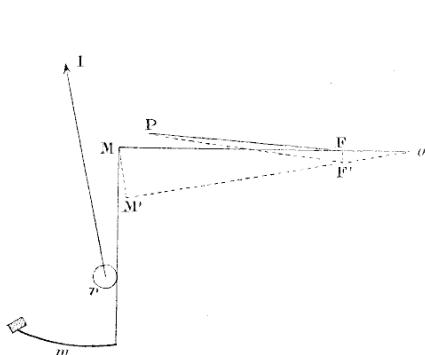


FIG. 127. — Dispositif amplificateur de l'ampèremètre thermique Olivetti.



FIG. 128. — Fil thermique du voltmètre Olivetti.

Lorsque aucun courant ne traverse l'instrument, le levier et le fil thermique sont presque parallèles ; mais, si le fil PF, sous l'action du passage d'un courant, s'échauffe et s'allonge, le point M du levier OM vient en M', et la longueur MM' est beaucoup plus grande que l'allongement PF'-PF du fil thermique.

En M est fixée l'extrémité d'un cordonnet qui s'enroule dans la gorge d'une petite poulie r , calée sur l'axe de l'aiguille indicatrice I, tandis que l'extrémité opposée est attachée à un ressort m qui maintient le système constamment tendu. Sur l'axe de l'aiguille indicatrice est également fixé un disque évidé en aluminium dont les bords pénètrent dans l'étroit entrefer d'un aimant ; on obtient ainsi un amortissement des oscillations qui assure l'apéridicité de l'instrument.

L'aiguille indicatrice de l'ampèremètre se déplace de 453 divisions sur le cadran pour un allongement du fil dilatable de 0,048 mm.

Le voltmètre thermique du même constructeur est représenté schématiquement sur la figure 128. Un fil de platine-argent de 0,03 mm de diamètre est enroulé plusieurs fois sur deux poulies de porcelaine munies de gorges.

Ces deux poulies sont distantes l'une de l'autre de 10 cm et, comme le fil dilatable fait environ 5 tours, sa longueur utile est de 1 mètre environ.

Chaque brin de fil se dilate, et l'allongement total est égal à la somme des allongements des 10 brins.

La poulie B est fixe, tandis que la poulie A actionne le petit bras d'un levier amplificateur qui commande l'aiguille indicatrice.

Suivant la tension que doit pouvoir mesurer le voltmètre, on monte en série avec le fil dilatable une résistance appropriée, non inductive et constituée avec un fil de même nature.

La disposition en brins parallèles du fil dilatable rend l'instrument très robuste et permet ainsi de suppléer à la faible résistance mécanique d'un fil qui n'a que 0,03 mm de diamètre.

VOLTMÈTRES ÉLECTROSTATIQUES

Voltmètre Carpentier. — Cet instrument, basé sur le même principe que l'électromètre du même constructeur, comporte les mêmes organes, mais est disposé pour pouvoir être fixé sur les tableaux de distributions.

Ce voltmètre (*fig. 129*) ne diffère de l'électromètre que par la manière dont est obtenu le couple antagoniste, dû ici à l'action de la pesanteur sur une petite masse en aluminium fixée à l'armature mobile.

L'instrument est gradué empiriquement en volts et l'armature est munie d'une légère aiguille en paille vernie qui se déplace sur le cadran gradué.

L'ensemble du système d'armatures fixes et mobiles repose sur un chariot à glissière qui permet d'enlever le cadre mobile de sa position normale pour vérifier l'état des pivots qui lui servent de suspension.

Ces voltmètres se construisent avec des graduations de 600 à 1 100 volts, de 700 à 1 300 volts, de 880 à 2 000 volts, de 1 000 à 2 500 volts et de 1 400 à 3 000 volts.

Voltmètre Chauvin et Arnoux. — Cet instrument (*fig. 130*) est basé sur le principe de l'électromètre à quadrants de lord Kelvin. Il comporte deux secteurs, l'un fixe et l'autre mobile, chargés à des potentiels différents et qui s'attirent mutuellement; le secteur mobile porte une aiguille indicatrice qui se déplace sur un cadran gradué.

Afin d'obtenir des déviations proportionnelles aux tensions, on a donné une certaine courbure au secteur fixe.

Le secteur mobile se meut entre les branches d'un aimant puissant; par suite, il est le siège de courants induits qui rendent ses mouvements apériodiques.

Afin de protéger l'instrument contre les décharges électrostatiques susceptibles de produire un court-circuit entraînant la destruction du voltmètre, une des bornes est reliée au secteur mobile par l'intermédiaire d'une résistance non inductive, très élevée, constituée par un simple trait de crayon tracé sur une plaque de verre dépoli.

Les différents organes sont disposés sur un plateau d'ébonite qui assure une isolation par-

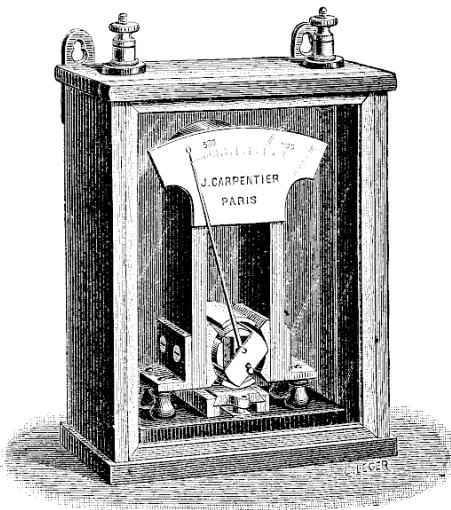


FIG. 129. — Voltmètre électrostatique Carpentier.

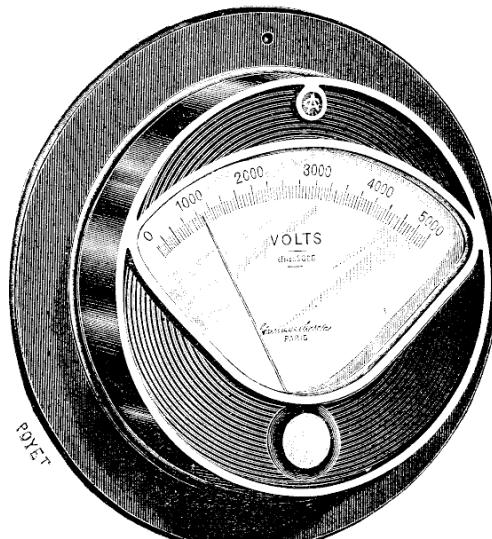


FIG. 130. — Voltmètre électrostatique Chauvin et Arnoux.

faite, afin d'éviter toute perte, si faible soit-elle, qui aurait pour résultat de fausser les indications ; ils sont, en outre, recouverts d'une boîte métallique isolée, les préservant des influences électriques extérieures et qui peut, au besoin, être reliée à la terre.

Les prises de courant sont placées derrière le plateau isolant, hors de la portée de la main.

Des fils fusibles, placés à l'extérieur et faciles à remplacer, préservent les organes intérieurs en cas d'un court-circuit accidentel.

Voltmètre lord Kelvin. — Le voltmètre électrostatique de lord Kelvin (fig. 131) est constitué par un condensateur à air dont l'armature verticale en aluminium et en forme de 8 est

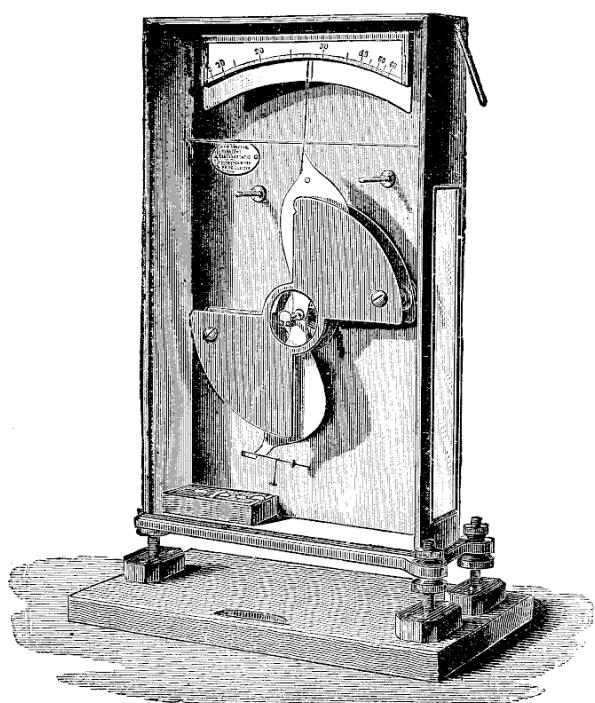


FIG. 131. — Voltmètre électrostatique lord Kelvin.

placée entre deux armatures fixes en laiton, ayant la forme de secteurs. Cet électromètre ne comportant qu'une paire de secteurs, la sensibilité de l'instrument est moitié moindre que celle des électromètres qui en comportent deux paires.

Les connexions entre les bornes de l'instrument et les armatures fixe et mobile du condensateur sont établies au moyen de tubes en U en verre, contenant un fil de coton humecté d'eau ; ce conducteur présente ainsi une grande résistance et on évite ainsi toute chance de détérioration de l'instrument, si un contact accidentel venait à se produire entre les armatures fixes et l'armature mobile ou la production d'un arc qui parfois aurait tendance à s'établir entre ces mêmes organes.

L'armature mobile est munie, à sa partie supérieure, d'une aiguille indicatrice qui se déplace devant un cadran gradué. Cette graduation comporte 60 divisions inégales, correspondant chacune à des différences de potentiel de valeur égale. A la partie inférieure de cette armature mobile, on peut accrocher différents poids servant à faire varier la sensibilité de l'instrument. Avec le poids le plus petit, chaque division du cadran correspond à 50 volts ; avec le poids moyen, à 100 volts, et, enfin, avec le gros poids, à 200 volts. Ces poids ont la forme d'un crochet,

ce qui permet de les suspendre au besoin les uns aux autres pour obtenir des sensibilités intermédiaires.

Le voltmètre électrostatique lord Kelvin n'est pas apériodique. On amortit les oscillations en manœuvrant avec précaution un frein que l'on actionne à l'aide d'une poignée disposée en dehors de la cage qui protège l'instrument. Ce frein est constitué par une petite tige horizontale en paille suspendue par deux fils de soie; à l'aide de la poignée, on approche ou on éloigne cette tige de l'armature mobile.

La cage de ce voltmètre est métallique et constitue ainsi un écran électrostatique.

Le voltmètre lord Kelvin est construit par M. James White, de Glasgow (Angleterre).

La Société Siemens et Halske, de Berlin, avait également exposé un type de voltmètre électrostatique du même modèle.

Voltmètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft. — Ce voltmètre électrostatique comporte une armature mobile dissymétrique, soumise à l'action de deux secteurs constituant l'armature fixe (*fig. 132*).

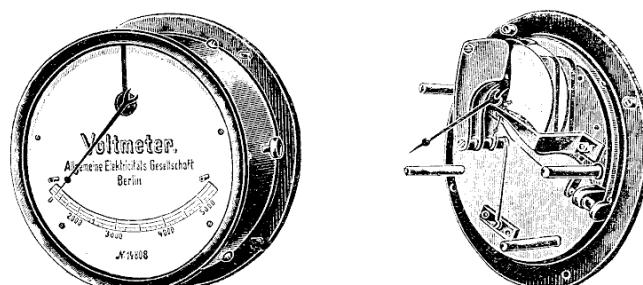


Fig. 132. — Voltmètre électrostatique de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

Le couple antagoniste est produit par un contrepoids.

Les oscillations de l'armature mobile sont amorties par un petit aimant.

Ces instruments présentent la particularité d'avoir des lames de micanite collées sur les faces internes des secteurs fixes, lames qui débordent largement afin d'éviter la destruction du voltmètre en diminuant les chances de production d'étincelles.

Ce dispositif empêche d'utiliser l'instrument pour la mesure des tensions continues, à cause de la polarisation du diélectrique.

Voltmètre Hartmann et Braun. — Ce modèle de voltmètre électrostatique (*fig. 133*) a été disposé spécialement pour les hautes tensions. Une armature fixe, presque verticale, agit sur une armature mobile suspendue, par sa partie supérieure, à un pivot qui lui permet de s'écartier légèrement de la verticale. La force antagoniste est l'action de la pesanteur.

Comme le déplacement de l'armature mobile est très faible, on a amplifié ce mouvement en attachant à la partie inférieure de cette armature un fil qui s'enroule sur un petit treuil monté sur l'axe qui porte l'aiguille indicatrice.

Un disque métallique, tournant entre les pôles d'un aimant, constitue le système amortisseur de cet instrument.

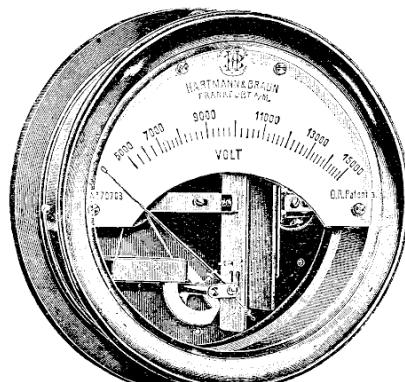


Fig. 133. — Voltmètre électrostatique Hartmann et Braun.

Voltmètre multicellulaire lord Kelvin. — Cet instrument (fig. 134) a été spécialement établi pour être placé sur les tableaux de distribution. Il donne des indications pour des tensions comprises entre 40 et 120 volts.

Pour donner à l'instrument une sensibilité suffisante permettant de mesurer des tensions inférieures à 100 volts, on a multiplié le nombre de secteurs fixes et mobiles.

L'armature mobile est constituée par une tige suspendue munie de 12 à 15 secteurs; ces secteurs s'engagent entre les intervalles qui séparent un même nombre de secteurs fixes. L'instrument est gradué empiriquement en volts.

Un bouton, placé à la partie supérieure de droite de la cage qui protège l'instrument, sert à manœuvrer l'armature mobile pour l'immobiliser lorsqu'on ne se sert pas de l'instrument ou pour la mettre en liberté au moment d'effectuer une mesure. La tige mobile qui porte les secteurs se prolonge à sa partie inférieure et se termine par un disque amortisseur plongeant dans du pétrole.

Un fil à plomb sert à vérifier si l'instrument est bien placé dans une position verticale. Deux vis calantes, dont une est visible à droite sur la figure, permettent de rectifier la position.

Un interrupteur sert à supprimer la communication du voltmètre avec l'un des conducteurs.

La cage qui protège l'instrument est métallique et constitue un écran électrostatique. de ces voltmètres pour mesurer diverses tensions dans les limites suivantes :

- n° 1 — de 40 à 120 volts,
- n° 2 — de 60 à 240 —
- n° 3 — de 80 à 400 —
- n° 4 — de 200 à 800 —
- n° 5 — de 300 à 1 600 —

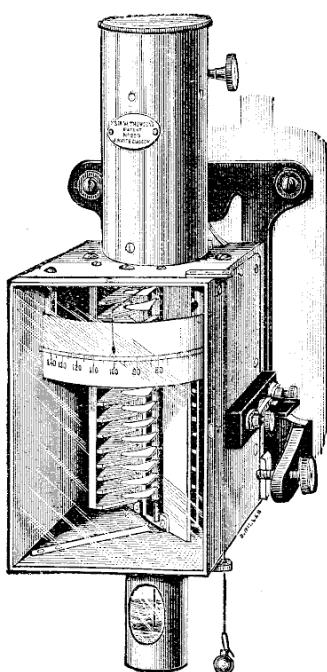


FIG. 134. — Voltmètre multicellulaire lord Kelvin.

Il se construit cinq modèles

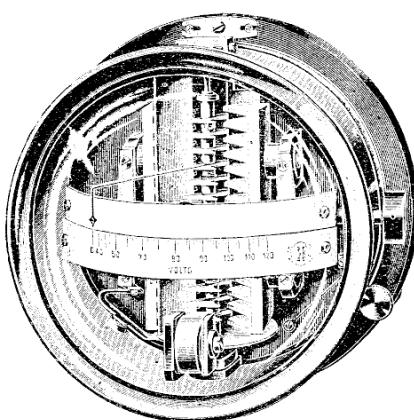


FIG. 135. — Voltmètre multicellulaire Hartmann et Braun.

En outre, l'amortisseur à liquide du voltmètre lord Kelvin est remplacé par un disque d'aluminium dont les bords passent entre les pôles de petits aimants.

Voltmètre Riccardo Arno. — Ce voltmètre électrostatique est basé sur le retard d'électrisation dû à la polarisation des diélectriques soumis à l'influence d'un champ électrique variable.

L'expérience fondamentale, réalisée en 1897, était la suivante : Sur un socle en ébonite

(fig. 136) sont fixés quatre segments *a*, *b*, *c*, *d* détachés d'un cylindre en métal et, au milieu de cet ensemble, est suspendu, par un fil de cocon *O*, un cylindre *H* en papier paraffiné.

Un alternateur *M* alimente le circuit primaire *PQ* d'une bobine de Ruhmkorff, dont on a calé le trembleur, ou d'un transformateur à très grand rapport de transformation. La tension est mesurée par un voltmètre *V* et l'intensité du courant, réglée par un rhéostat *r*, traverse un électrodynamomètre *E*.

Le secondaire de la bobine *RS*, où la tension atteint quelques milliers de volts, est fermé sur une résistance non inductive *AB*, montée en série avec un condensateur *CD*. On obtient ainsi entre les points *A*, *B*, *C*, *D* deux courants décalés d'un quart de période.

Les segments *a*, *b*, *c*, *d* sont respectivement reliés aux points *A*, *B*, *C*, *D*.

A l'intérieur de ces quatre segments, il se développe un champ électrique tournant et le cylindre diélectrique *H* se met à tourner dans le sens de rotation du champ électrique.

Un inverseur *1*, *2*, *3*, *4* permet de renverser la polarité des segments *c*, *d*, et l'on voit alors le cylindre *H* tourner en sens inverse, le sens de rotation du champ électrique se modifiant chaque fois qu'on agit sur l'inverseur.

A l'Exposition, M. Riccardo Arno a démontré cette propriété des diélectriques en faisant fonctionner un appareil à peu près semblable à celui qui vient d'être décrit.

Cet instrument, plus simple que le précédent, se compose d'un support en ébonite *M* (fig. 137), sur lequel sont collés trois secteurs en papier d'étain *a*, *b*, *c*. Ces secteurs ont un angle d'environ 420° et laissent entre eux trois bandes rayonnantes qui les isolent l'un de l'autre.

Au milieu du plateau d'ébonite est plantée une pointe qui sert de pivot à un disque de mica *D*, muni en son milieu d'une chape *C* identique à celle des aiguilles de boussole.

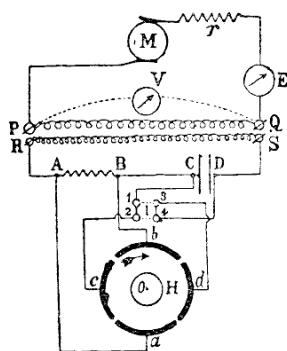


FIG. 136. — Principe du voltmètre Riccardo Arno.

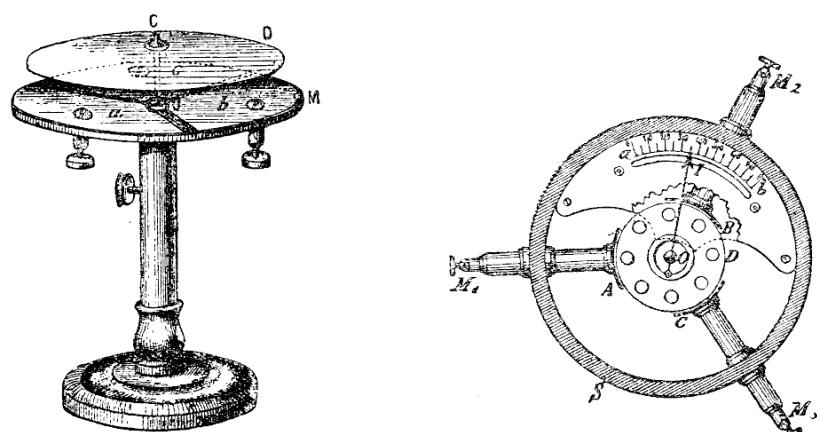


FIG. 137. — Appareil de démonstration du principe du voltmètre électrostatique Riccardo Arno.

FIG. 138. — Voltmètre électrostatique Riccardo Arno.

Dès que les trois fils d'une distribution triphasée de haute tension étaient réunis aux trois bornes communiquant aux secteurs, le disque de mica, placé à quelques millimètres au-dessus, se mettait à tourner et prenait à peu près la vitesse du synchronisme, réalisant ainsi un véritable moteur asynchrone électrostatique.

En invertissant deux quelconques des fils, le champ tournait en sens inverse : il en était de

même du disque de mica. Il suffit d'une tension de 1 000 volts pour assurer l'entraînement du disque.

Le professeur Riccardo Arno a construit plusieurs appareils de mesure, intéressants et fort simples, basés sur ce système, entre autres un voltmètre qui figurait à l'Exposition.

Dans cet instrument (*fig. 438*), on retrouve, comme dans l'appareil de démonstration, trois segments de cylindre métallique A, B et C, que l'on relie au circuit triphasé par l'intermédiaire des bornes M_1 , M_2 et M_3 .

Le cylindre D, en papier paraffiné, a sa partie supérieure percée de huit trous destinés à l'alléger. L'aiguille OI se déplace devant une graduation empirique *ab*.

Le champ tournant électrostatique exerce sur le cylindre D un couple proportionnel à la tension entre deux quelconques des bornes M_1 , M_2 , M_3 , tandis que le couple résistant est produit par un petit ressort spiral de montre fixé au cylindre D et à l'axe de suspension.

Les divisions sont égales, ce qui ne se rencontre jamais dans les électromètres ordinaires. Celui-ci est certainement un des plus originaux.

RÉSISTANCES ET INSTRUMENTS POUR LA MESURE DES RÉSISTANCES

RÉSISTANCES

Résistances étalons. — M. J. Carpentier avait exposé une copie de l'étalon prototype de l'ohm constituée par un tube de verre horizontal, soigneusement calibré et terminé par des coupes élargies à chacune de ses extrémités ; ce tube est rempli de mercure pur. Pour établir la communication de l'étalon avec le circuit extérieur, on plonge dans les coupes des électrodes en cuivre amalgamé.

L'exposition de M. Carpentier comprenait également des étalons secondaires, à mercure, du modèle de M. R. Benoît (fig. 139). La colonne de mercure est renfermée dans un tube de verre plusieurs fois recourbé, de 1 mm^2 de section environ et de longueur réglée par tâtonnement pour amener la valeur de la résistance aussi près que possible de l'unité. Les extrémités de ces tubes pénètrent dans

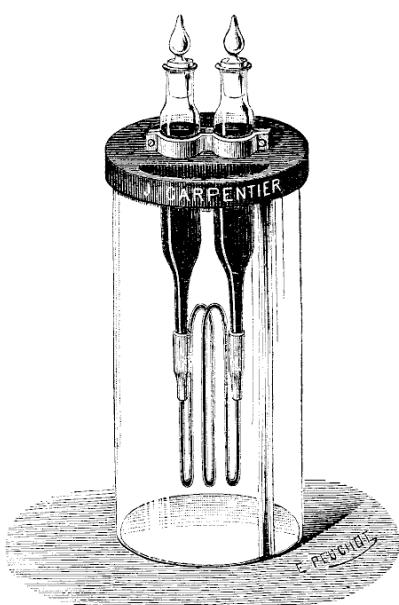


Fig. 139. — Étalon secondaire de l'ohm modèle R. Benoit.

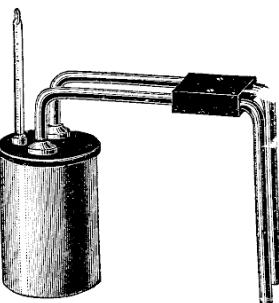


Fig. 140. — Étalon de l'ohm modèle Carpentier.

des flacons destinés à établir la communication électrique et servant, par conséquent, de prises de courant ; ces flacons ont une section d'environ 500 à 600 fois celle du tube dont les extrémités pénètrent

jusqu'au quart environ de leur partie la plus large.

L'ohm étalon en fil métallique, exposé aussi par M. Carpentier, est en fil de maillechort ou de manganin roulé sur une bobine en bois paraffiné. La bobine terminée est recouverte d'une couche de paraffine destinée à empêcher l'humidité de produire des dérivations et placée ensuite dans une boîte cylindrique en laiton fermée par un couvercle en ébonite (fig. 140). Une ouverture pratiquée dans ce couvercle permet d'introduire un thermomètre à l'intérieur de la

boîte. Cet étalon est disposé pour pouvoir être plongé, si on le désire, dans un bain à température constante.

L'Institut physico-technique Impérial de Charlottenbourg (Allemagne) exposait l'appareil servant à déterminer la valeur de l'ohm suivant la définition légale. Cet appareil comporte des tubes en verre remplis de mercure, disposés horizontalement, dont les extrémités pénètrent dans des boules en verre munies de fils de platine soudés servant à établir les connexions électriques. Cinq tubes semblables sont disposés dans une boîte en cuivre remplie de pétrole refroidi par de la glace fondante et, par conséquent, à la température de 0°. Les tubes sont préalablement soigneusement vérifiés au point de vue du calibre, de la longueur et de la section transversale. Ils sont, en outre, comparés soigneusement de temps en temps entre eux et avec les copies de l'ohm étalon, pour que l'Institut soit toujours en mesure d'effectuer les vérifications de résistances qu'on lui envoie.

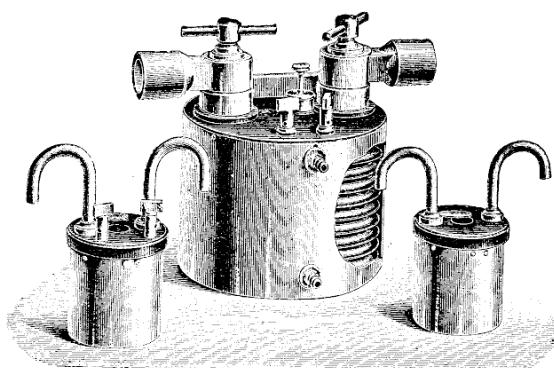


FIG. 141. — Résistances étalons, modèles Hartmann et Braun.

L'exposition de l'Institut physico-technique comprenait aussi des copies de l'ohm étalon établies avec des tubes de verre recourbés avec vases soudés aux extrémités. Ces appareils sont d'abord remplis de mercure pur; on y fait ensuite le vide et, enfin, on scelle les extrémités à la lampe d'émailleur. La valeur de l'ohm ayant été déterminée à la température de 0°, il est nécessaire, pour utiliser ces copies, de les plonger dans un bain de pétrole ayant cette température. Dans chaque vase extrême sont soudés trois fils de platine servant à établir les communications électriques.

L'appareil pour comparer les résistances étalons de valeurs approximativement égales, qui figurait également dans les vitrines de l'Institut, se compose de bains de pétrole de forme allongée, dont un peut être chauffé par la chaleur développée par le passage d'un courant dans une résistance. Pour la détermination du rapport de deux résistances, on se sert d'une boîte, reliée en dérivation, comportant deux résistances élevées, de 100 ohms par exemple; entre ces deux résistances s'en trouve une autre ayant pour valeur la millième partie de l'une d'elles, soit 0,1 ohm dans l'exemple actuel. La résistance du conducteur reliant les deux étalons à comparer est éliminée à l'aide d'une seconde boîte de résistances identique à la première. Grâce à ce dispositif, on peut atteindre facilement une précision de quelques millionièmes.

MM. Hartmann et Braun, de Francfort (Allemagne), exposaient des résistances étalons (fig. 141), établies d'après les types de l'Institut de Charlottenbourg. Ces résistances sont en managanin ou en constantan afin que leur coefficient de température soit négligeable. Les prises de courant de ces résistances sont nickelées pour pouvoir établir les connexions à l'aide de godets remplis de mercure. Ces résistances sont enfermées dans des boîtes de métal perforées, soigneusement nickelées pour pouvoir les plonger, sans qu'elles soient détériorées, dans des bains de pétrole lorsqu'on veut effectuer des mesures à température constante. Le modèle représenté sur la droite de la figure 141 se construit pour des résistances de 0,1; 1; 10; 100; 1000; 10 000

et 100 000 ohms. Le modèle représenté sur la gauche de la même figure est celui des résistances de 0,01 ohm, pouvant être utilisées comme shunts d'ampèremètre; la résistance est constituée par une lame de manganin ou de constantan: ce modèle comporte, indépendamment des prises de courant, deux bornes d'attache spéciales. Enfin, le modèle représenté sur le milieu de la figure 141 est une résistance étalon de 0,001 ohm, pouvant également servir de shunt d'ampèremètre pour des courants dont l'intensité peut atteindre 300 et même 1 000 ampères, lorsqu'on utilise un dispositif permettant de refroidir convenablement cette résistance constituée par une lame de manganin à grande surface; à cet effet, la résistance est placée dans un vase métallique que l'on remplit de pétrole et à l'intérieur duquel se trouve un serpentin parcouru par un courant d'eau froide; un agitateur mécanique permet d'uniformiser la température. Cette résistance étalon est munie, en outre, à la partie supérieure, d'une lame de cuivre servant à la mettre en court-circuit et de deux bornes destinées à recevoir les conducteurs du circuit dérivé et reliées directement aux extrémités de la résistance.

Les résistances étalons exposées par la Société Siemens et Halske, de Berlin (Allemagne), sont établies avec du fil de manganin dont le coefficient de température est inférieur à 0,00002 par degré centigrade. Ces étalons, exacts à 1/10 000 près de leur valeur, sont, sur demande, contrôlés et certifiés exacts par l'Institut de Charlottenbourg. Les petits modèles ont respectivement des résistances de 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1 000 et 10 000 ohms. Les grands modèles, pour les très faibles résistances de 0,001 et de 0,0001 ohm, sont accompagnés d'un bain de pétrole avec agitateur mécanique et serpentin.

La Société Siemens et Halske avait également exposé un dispositif spécial pour la comparaison des résistances étalons. Ce dispositif comporte trois bains de pétrole séparés par des couches d'air; des godets à mercure servent à établir les communications et deux agitateurs, mis en mouvement par un petit moteur électrique, permettent d'uniformiser la température du bain. Cet appareil comporte, comme accessoires, deux boîtes de résistances contenant chacune deux bobines de 10 ohms, une résistance étalon de 0,01 ohm et deux résistances étalons de 10 ohms.

M. Otto Wolff, de Berlin (Allemagne), avait exposé dans les vitrines de l'Institut de Charlottenbourg des résistances étalons d'un nouveau modèle. Ces étalons, constitués par des lames de manganin, diffèrent des anciens modèles par la disposition donnée aux prises de courant qui sont établies à l'aide d'une pièce de cuivre massive dans laquelle sont soudées les extrémités des lames constituant la résistance. Les petits modèles, utilisés comme étalons et aussi pour les mesures d'intensité de courant par la méthode indirecte, ne peuvent absorber au maximum que 100 watts, même lorsqu'ils sont placés dans un bain de pétrole approprié; les grands modèles peuvent absorber jusqu'à 1 000 watts. Pour étalonner ces résistances, on prend des lames de manganin ayant une résistance moindre que la valeur que l'on veut leur donner; on diminue ensuite leur section transversale en perçant des trous plus ou moins grands jusqu'à ce que l'on ait obtenu la valeur exacte. Par ce procédé, on arrive sans difficulté à obtenir une résistance de 0,0001 ohm, exacte à moins d'un dix-millième.

M. Otto Wolff exposait aussi des résistances étalons en fil de manganin pour des valeurs allant depuis 0,1 ohm jusqu'à 100 000 ohms. Le fil de manganin employé est vieilli artificiellement avant l'étalonnage définitif en chauffant les bobines terminées, pendant dix heures, dans une étuve portée à la température de 140°. Dans ces conditions, on obtient des résistances variant aussi peu que possible avec le temps.

MM. Keiser et Schmidt, de Berlin (Allemagne), avaient exposé des résistances étalons établies d'après les types de l'Institut de Charlottenbourg et étalonnées à la température de 20°. Ces étalons, en manganin, sont enfermés dans une boîte métallique perforée que l'on plonge dans un bain de pétrole pour pouvoir en déterminer exactement la température et aussi pour obtenir une déperdition plus rapide de la chaleur produite par le passage du courant.

M. James White, de Glasgow (Grande-Bretagne), construit des résistances étalons de diverses valeurs, depuis 0,01 ohm jusqu'à 10 000 ohms, contrôlées par le Board of Trade. Ces

résistances sont en manganin; celles de 0,01, 0,1 et 1 ohm ont un double enroulement, l'un en gros fil, l'autre en fil fin servant à déterminer l'étalonnage avec la plus grande précision.

Résistances étalonnées. — Pour effectuer des mesures d'intensité de courant par la méthode indirecte de la chute de tension produite aux bornes d'une résistance parcourue par le courant, il est nécessaire d'avoir à sa disposition des résistances étalonnées ou shunts.

Ces instruments sont constitués par des lames, des barres ou des grilles de maillechort ou d'un autre alliage, dont la résistivité varie peu avec la température. Le plus souvent, ces résistances sont suffisamment refroidies par l'air ambiant; dans certains cas, il est nécessaire de les refroidir artificiellement.

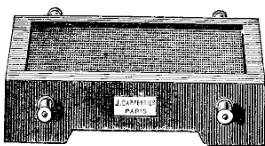


Fig. 142. — Shunt en fil de manganin.

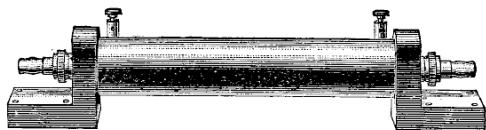


Fig. 143. — Shunt de 0,0001 ohm à circulation d'eau.

M. J. Carpentier, de Paris, avait exposé plusieurs modèles de shunts. Celui que représente la figure 142 est en fil de manganin, ayant une résistance de 0,01 ohm et pouvant supporter un courant de 100 ampères. L'air ambiant suffit pour le refroidir convenablement. Les shunts à circulation d'eau (*fig. 143 et 144*) sont constitués par un tube de maillechort terminé à ses extrémités par des raccords permettant de les relier à une conduite d'eau, par l'intermédiaire de tubes de caoutchouc. Des prises de courant et des bornes sont soudées sur le tube, de façon



Fig. 144. — Shunt de 0,001 ohm à circulation d'eau.

que la résistance comprise entre ces dernières soit exactement de 0,0001 ohm (*fig. 143*) ou de 0,001 ohm (*fig. 144*). Le shunt de 0,001 ohm peut supporter un courant de 1 000 ampères et celui de 0,0001 ohm un courant de 2 000 ampères. Comme la différence de potentiel aux bornes de ces résistances ne dépasse pas 1 volt pour le courant le plus intense qu'ils ont à supporter, il n'y a pas à craindre de phénomènes d'électrolyse. L'étalonnage approximatif de la résistance, comprise entre les deux bornes, étant obtenu par excès, on le termine en frottant le tube avec du papier d'émeri très fin ou avec du rouge d'Angleterre.

MM. Chauvin et Arnoux, de Paris, ont exposé des shunts déjà décrits à propos de leurs ampèremètres. Ils sont formés de lames de maillechort superposées, entre lesquelles on a laissé un espace vide, égal à leur épaisseur, afin de faciliter le refroidissement. Ces lames sont soudées par leurs extrémités dans de fortes pièces de bronze qui se terminent par des mâchoires dans lesquelles on fixe les conducteurs. Ces shunts sont étalonnés en donnant de petits traits de scie dans les lames de maillechort.

Les résistances étalonnées exposées par l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft, de Berlin (Allemagne), sont constituées par des barres de maillechort superposées, dont les extrémités sont prises dans deux blocs de cuivre munis de mâchoires pour fixer les conducteurs. Ces résistances se construisent en plusieurs dimensions et peuvent supporter des courants dont l'intensité peut atteindre 8 000 ampères pour le plus gros modèle.

La Société Siemens et Halske, de Berlin (Allemagne), construit des résistances étalonnées qui ont déjà été décrites avec le milliampèremètre et millivoltmètre exposé par cette Société.

MM. Crompton et C^{ie}, de Londres (Grande-Bretagne), exposaient toute une série de résistances étalonnées en manganin sous forme de fils, de lames et de tubes avec refroidissement par l'air et par circulation d'eau.

MM. James White, de Glasgow (Angleterre), Hartmann et Braun, de Francfort (Allemagne), et le Dr Horn (Allemagne) avaient également exposé des résistances étalonnées formées de lames de maillechort.

L'Institut de Charlottenbourg avait exposé un modèle des résistances très élevées de Kundt. Ces résistances présentent quelques particularités très intéressantes, surtout au point de vue de leur fabrication. Pour les obtenir, on prépare un mélange de chlorures d'or et de platine qu'on délaie dans de l'huile de camomille ; au moyen d'un pinceau imbibé de cette préparation et monté sur le chariot d'un tour, on trace une hélice sur un tube de porcelaine placé sur ce tour. Ce tube est ensuite porté à la température du rouge dans un four à moufle, les chlorures sont alors réduits à l'état métallique, laissant sur la porcelaine une hélice très adhérente et excessivement mince en or-platine. La résistance électrique de cette hélice est considérable ; ainsi, par exemple, sur un tube de 15 cm de longueur et de 4 cm de diamètre, on peut tracer une hélice de 1 mm de largeur dont le pas est de 0,5 mm ; sa résistance atteint plusieurs mégohms. Il est naturellement facile de tracer deux hélices voisines et réunies à une de leurs extrémités, de manière que cet enroulement ne présente pas de self-induction. L'étalonnage de ces résistances se fait très facilement en retouchant les spires à la meule d'émeri. Un dépôt galvanique, effectué aux extrémités libres des hélices, permet d'y souder des bornes de prise de courant. Les très grandes résistances étant d'un prix fort élevé, on a, par le procédé Kundt, un moyen économique de les obtenir.

La Société Siemens et Halske, de Berlin (Allemagne), exposait une résistance en graphite de 100 mégohms. Cette résistance, exempte d'induction et de capacité, se compose de cinq parties ayant de 10 à 50 mégohms ; elle est enroulée dans une rainure hélicoïdale pratiquée sur un cylindre d'ébonite protégé par une enveloppe en laiton. Le socle porte plusieurs bornes permettant de fractionner cette résistance.

BOITES DE RÉSISTANCES ET PONTS

Boîtes de résistances. — Un grand nombre de boîtes de résistances, avec ou sans pont, figuraient à l'Exposition. Quoique les boîtes à chevilles soient toujours très employées, on tend aujourd'hui, surtout en Allemagne, à substituer aux chevilles des commutateurs à manette beaucoup plus commodes.

Dans les premiers modèles de boîtes à contacts glissants, le courant passait par l'axe des manettes et il en résultait des résistances de contact assez variables. On n'emploie plus maintenant ce dispositif et l'on utilise des commutateurs à balais, étudiés d'après les modèles bien connus de l'appareillage pour éclairage électrique et pour courants intenses. L'emploi de frotteurs à balais avec larges surfaces de contact donne toute satisfaction, le nettoyage des contacts se faisant automatiquement par suite du frottement produit par la manœuvre des manettes.

Les boîtes de résistances à décades et à chevilles de M. J. Carpentier, avec ou sans pont

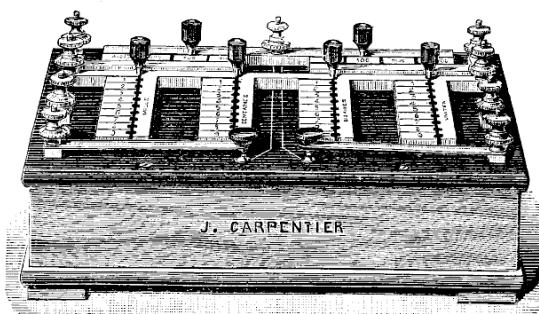


Fig. 145. — Boîte de résistances à décades, modèle Carpentier.

de Wheatstone, sont du modèle que représente la figure 145. Elles sont munies parfois de clés à ressort destinées à fermer les circuits de la pile et du galvanomètre.

Les boîtes à contacts glissants du même constructeur (*fig. 146*) comportent une série de plots disposés circulairement et sur lesquels viennent frotter des manettes. Chaque groupe de

résistances (unités, dizaines, centaines, milliers) a une manette qui est reliée à celle du groupe suivant. Le courant, entrant par le plot zéro d'une série, traverse les bobines comprises entre ce plot et la manette, et, de là, va à la manette du groupe suivant. La manœuvre de ces boîtes est plus facile et plus rapide; mais elles sont moins précises que les précédentes à cause de la résistance variable des contacts qui, toutefois, est inférieure à 0,1 ohm pour tous les contacts de la boîte à quatre décades et à quatre manettes. Ces boîtes à contacts glissants se

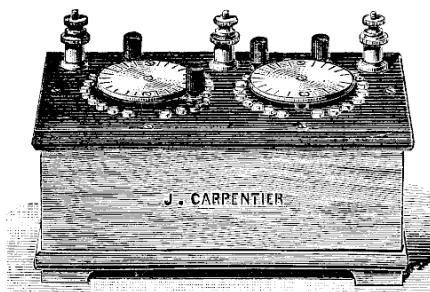


Fig. 146. — Boîte de résistances à contacts glissants, modèle Carpentier.

construisent aussi avec pont de Wheatstone permettant, par la manœuvre d'une manette supplémentaire, d'obtenir entre les bras de proportion les rapports 1/100, 1/10, 1, 10 et 100.

M. J. Carpentier exposait aussi une boîte de dix bobines de 100 000 ohms, donnant au total 1 mégohm.

La maison Breguet et M. Ducretet, de Paris, avaient également exposé des boîtes de résistances à chevilles du modèle bien connu.

L'Institut physico-technique Impérial de Charlottenbourg (Allemagne) exposait plusieurs boîtes de résistances.

Une de ces boîtes, à chevilles, est du modèle Siemens et Halske avec bobines en fil de manganin et plots disposés pour recevoir, indépendamment des chevilles ordinaires, des chevilles spéciales munies d'une borne pour prise de courant. La série des résistances va de 0,1 à 50 000 ohms. Elle sort des ateliers de M. Otto Wolff, de Berlin.

Une autre boîte de résistances à contacts glissants comporte quatre décades, composées chacune de neuf bobines ayant une résistance de 0,1; 1; 10 et 100 ohms. Une seconde boîte du même modèle comporte également quatre décades de 1, 10, 100 et 1 000 ohms.

L'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft, de Berlin, avait exposé plusieurs modèles de boîtes de résistances, parmi lesquelles nous citerons :

1^o Une boîte de 10 000 ohms de résistance totale, à chevilles, graduée de 0,1 ohm à 5 000 ohms avec bras de proportion comportant chacun quatre bobines de 1, 10, 100 et 1 000 ohms;

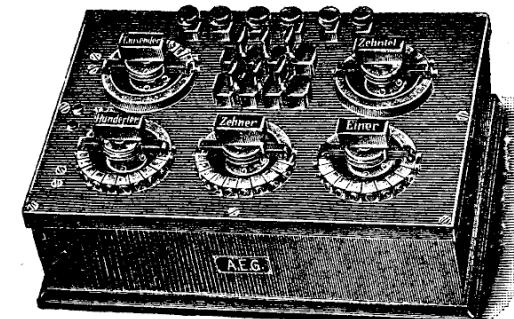


Fig. 147. — Boîte de résistances à décades et à manettes, modèle de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

2^o Une boîte de résistances transportable avec pont et galvanoscope; la série des résistances va de 1 à 500 ohms;

3^o Une boîte de résistances à contacts glissants avec cinq décades comprenant chacune neuf bobines ayant une résistance de 0,1; 1; 10; 100 et 1 000 ohms et bras de proportion à trois bobines de 1, 10 et 100 ohms (*fig. 147*).

Le Dr Th. Edelmann, de Munich (Allemagne), construit des boîtes de résistances de précision avec bobines en fil de manganin qui, avant d'être étalonnées, sont soumises pendant un

certain temps à une température de 100°, afin de leur assurer une résistance constante. Toutes les bobines d'une valeur inférieure à 20 ohms ont un fil supplémentaire, relié en dérivation à l'enroulement principal, sur lequel on effectue les corrections, lors de l'étalonnage définitif. Le Dr Edelmann n'emploie pas, pour les boîtes de précision, les chevilles avec têtes en ébonite qui ne peuvent supporter l'effort nécessaire pour assurer un serrage suffisant entre les plots ; il utilise des fiches en laiton que l'on serre à l'aide d'une clé spéciale. De cette manière, toutes les irrégularités disparaissent et 30 chevilles de 7 mm de diamètre ne donnent pas une erreur supérieure à $\pm 0,0003$ ohm. En outre, chaque boîte de résistances est munie d'un fil de manganin qui porte à une valeur simple la valeur des résistances de contact, soit 0,005 ohm, par exemple ; dans ces conditions, on peut effectuer immédiatement la correction.

Les boîtes de résistances à cheville exposées par MM. Hartmann et Braun, de Francfort (Allemagne), ont leurs bobines à double enroulement établies avec des fils en alliage ayant un

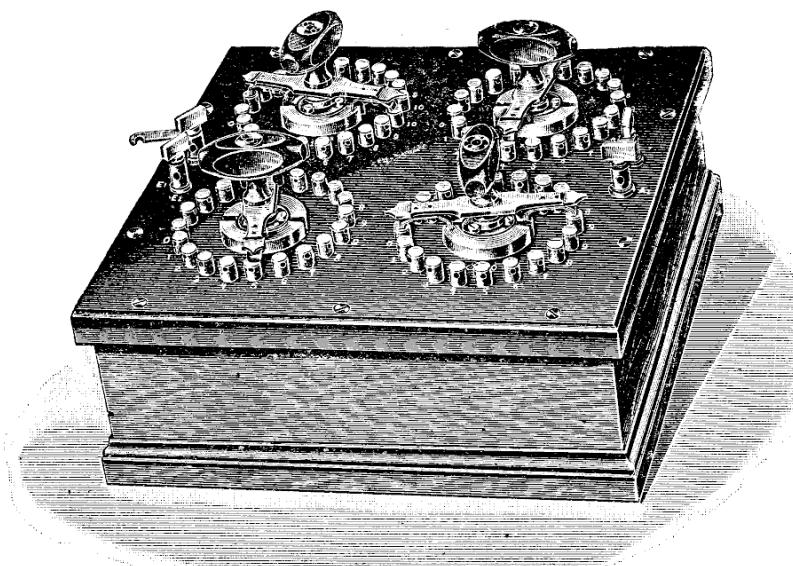


FIG. 148. — Boîte à décades doubles et à manettes, modèle Hartmann et Braun.

coefficient de température pratiquement négligeable ; en outre, les bobines ne sont étalonnées qu'assez longtemps après leur fabrication. Le commencement et la fin de l'enroulement de deux bobines consécutives ne sont pas reliés à une tige commune, mais sont soudés à des tiges métalliques séparées et reliées à un même plot. Grâce à cette disposition, la somme des résistances, mesurées isolément, est égale à la résistance totale de la boîte. Chaque plot est fixé, à l'aide de rivets et de vis, sur la plaque d'ébonite servant de couvercle ; chacun d'eux porte, en outre, des ouvertures latérales destinées à recevoir des chevilles spéciales avec borne, permettant ainsi de prendre chaque résistance isolément, afin d'éviter toute cause d'erreur due aux résistances de contact des autres chevilles. Au lieu d'adopter, pour les séries de résistances d'une boîte, l'ordre habituel 1, 2, 2, 3, 10, 20, 20, 50, 100, etc., les résistances se succèdent dans l'ordre suivant : 1, 2, 3, 4, 10, 20, 30, 40, 100, etc.

Une boîte à décades doubles et à manettes (fig. 148) figurait également dans l'exposition de MM. Hartmann et Braun. Une seule manette suffit pour faire varier les résistances de chaque décade double ; dans ces conditions, quelle que soit la position des manettes, on a, entre deux bornes de l'instrument, une résistance de valeur constante, égale à la moitié de la somme des décades doubles, soit 10000 ohms, tandis qu'entre une de ces bornes et une troisième la valeur des résistances intercalées peut varier depuis 0 jusqu'à 10000 ohms.

Un autre modèle de boîtes de résistances à contacts glissants avec pont, également exposé par MM. Hartmann et Braun, comprend quatre décades de dix bobines ayant une résistance de 1, 10, 100 et 1 000 ohms, au total 11 110 ohms; les bras de proportion comportent chacun trois bobines : l'un avec des bobines de 1, 10 et 100 ohms; l'autre avec des bobines de 10, 100 et 1 000 ohms. Cette boîte est munie, en outre, d'une clé à double contact et permet de mesurer des résistances depuis 1 ohm jusqu'à 10 mégohms.

MM. Keiser et Schmidt, de Berlin (Allemagne), avaient exposé :

- 1^o Une boîte de résistances de précision à chevilles, établie d'après les modèles de l'Institut de Charlottenbourg ;
- 2^o Une boîte de résistances à décades et à chevilles ;
- 3^o Une boîte de résistances, formant pont de Wheatstone, avec bobines de 1, 10, 100 et 1 000 ohms dans chaque bras de proportion ;

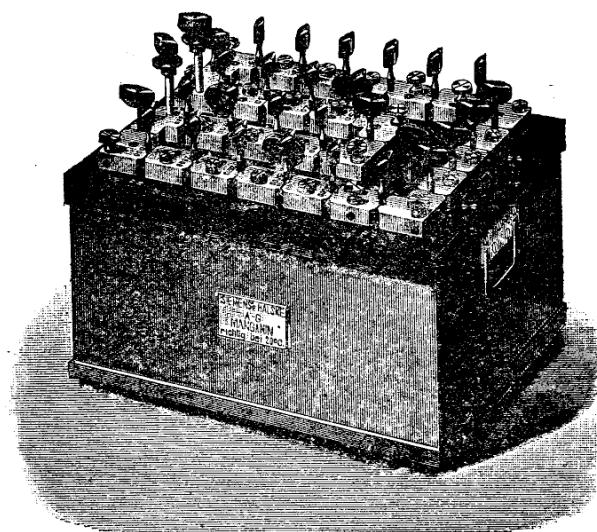


FIG. 149. — Boîte de résistances à décades, modèle Kohlrausch.

4^o Une boîte de résistances à décades et à contacts glissants du modèle adopté par le service technique des télégraphes ;

5^o Une boîte de résistances à chevilles depuis 0,1 ohm jusqu'à 1 000 ohms avec pont, ayant quatre résistances, de 1, 10, 100 et 1 000 ohms, dans chaque bras de proportion ;

6^o Une boîte de résistances à chevilles, par décades, ayant respectivement chacune dix bobines de 0,1 ; 1 ; 10 et 1 000 ohms avec pont de Wheatstone dont les bras comportent chacun quatre résistances de 1, 10, 100 et 1 000 ohms ;

7^o Une boîte de résistances avec pont, du modèle du service technique des télégraphes ; cette boîte avec contacts glissants comporte cinq décades circulaires et les bras de proportion du pont ont chacun trois bobines de 10, 100 et 1 000 ohms.

Parmi les nombreux instruments exposés par la Société Siemens et Halske, de Berlin (Allemagne), on peut citer les suivants :

1^o Boîte de résistances de précision à chevilles, du modèle de Kohlrausch, ayant une résistance totale de 20 000 ohms ; les bobines sont complètement exemptes d'induction et de capacité ; elles sont enroulées d'après le système Chaperon avec fil unique, chaque couche ayant un sens d'enroulement inverse du précédent. Les résistances sont égales à la valeur inscrite à moins de 1/2000. La disposition donnée aux plots permet, à l'aide de chevilles, d'isoler certains groupes de résistances (fig. 149) :

2^o Boîte de résistances de précision à contacts glissants d'une résistance totale de 10 000 ohms. Chacune des cinq séries comprend neuf bobines ayant une résistance de 0,1; 1; 10; 100 et 1 000 ohms. Le courant est amené aux différentes manettes par des ressorts en cuivre en spirale, afin d'éviter les résistances de contacts de l'axe ;

3^o Boîte de résistances à contacts glissants, d'une résistance totale de 400 000 ohms avec quatre séries de neuf bobines ayant des résistances de 10, 100, 1 000 et 10 000 ohms. Une cinquième manette permet de mettre en circuit un fil de compensation de 10 ohms de résistance, lorsqu'on veut mesurer des résistances inférieures à 10 ohms (*fig. 150*) ;

4^o Boîte de résistances à chevilles avec pont, d'une résistance totale de 10 000 ohms, avec bobines de 1, 10, 100 et 1 000 ohms dans chaque bras de proportion du pont.

Les instruments exposés par M. Otto Wolff, de Berlin (Allemagne), étaient, d'abord, une boîte de résistances à chevilles avec pont, comportant cinq bobines de 0,1; 1; 10; 100 et

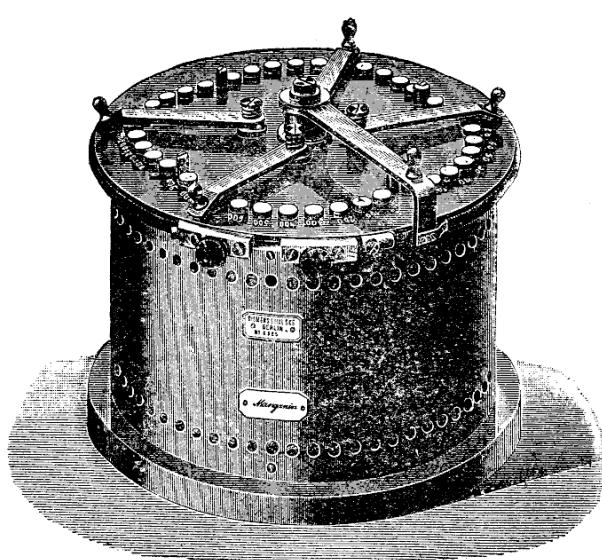


FIG. 150. — Boîte de résistances à contacts glissants, modèle Siemens et Halske.

1 000 ohms dans chaque bras et une série de bobines depuis 0,1 jusqu'à 50 000 ohms, formant ensemble une résistance totale de 111 100 ohms; puis une boîte de résistances à contacts glissants avec pont comportant dans chaque bras des bobines de 10, 100, 1 000 et 10 000 ohms, plus trois résistances supplémentaires de 1; 0,1 et 0,01 ohm qui, à l'aide de chevilles, peuvent être reliées à l'un des deux bras du pont; la série des résistances de comparaison est disposée en six décades, dont les bobines ont respectivement 0,1; 1; 10; 100; 1 000 et 10 000 ohms.

M. Otto Wolff, de Berlin, exposait, en outre, dans les vitrines de l'Institut de Charlottenbourg, une boîte de résistances en fil de manganin recouvert, enroulé en une seule couche sur des feuilles de mica. Des contacts glissants permettent de faire varier les résistances mises en circuit; les manettes sont munies de balais en lames minces d'argent qui glissent sur la tranche des feuilles de mica et établissent le contact avec les fils de l'enroulement dénudés en ce point; la position des manettes sur les différentes résistances est indiquée par des chiffres qui se présentent dans de petites fenêtres ménagées à cet effet sur la partie biseautée antérieure de la boîte (*fig. 151*). Ce mode de construction des boîtes de résistances présente les avantages suivants :

- 1^o Manœuvre rapide et facile;
- 2^o Résistances de contact excessivement faibles

3° Ventilation parfaite des résistances;

4° Résistances sans induction ni capacité.

Le total des résistances de cette boîte atteint 100 000 ohms.

Dans la section anglaise, des boîtes de résistances avec et sans pont avaient été exposées par M. James White, de Glasgow; Crompton et C^{ie}, de Londres, et la Cambridge Scientific Instrument Company, de Cambridge.

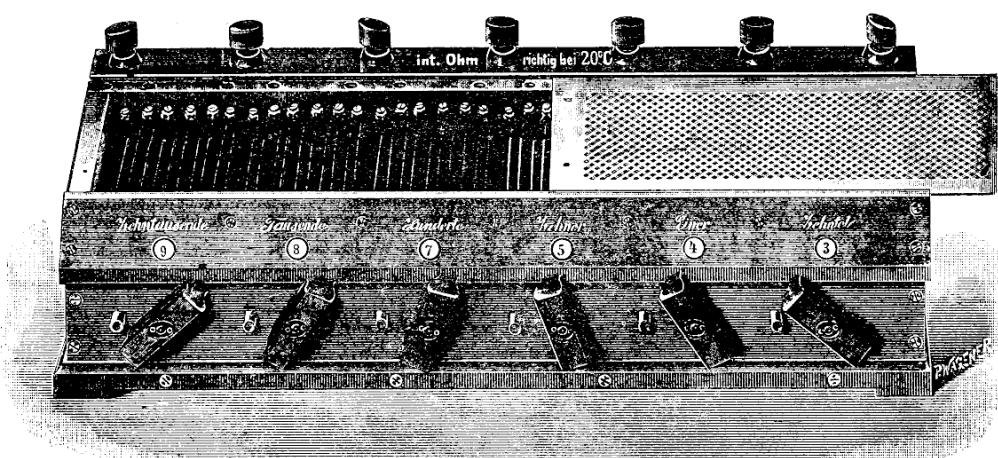


FIG. 151. — Boîte de résistances à manettes, modèle Otto Wolff.

Pont de Wheatstone. — Un pont grand modèle pour les mesures très précises de résistances, semblable à celui qui a servi à la comparaison des étalons de l'ohm légal établis par M. R. Benoît, était exposé par son constructeur, M. J. Carpentier.

Ponts doubles lord Kelvin. — Le pont pour la mesure de faibles résistances que représente la figure 152 a été réalisé par le même constructeur. Il est basé sur le principe du pont double de lord Kelvin et permet de mesurer des résistances comprises entre 1 microhm et 1 ohm.

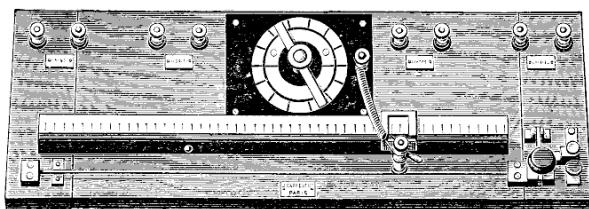


FIG. 152. — Pont Carpentier pour la mesure de faibles résistances.

Ce pont comporte deux couronnes de cuivre concentriques divisées en plusieurs secteurs; la couronne extérieure a 14 secteurs, tandis que la couronne intérieure n'en a que 2. Un bras diamétral porte un frotteur à chacune de ses extrémités; ce frotteur, constitué par un ressort lame, appuie sur les couronnes et les réunit métalliquement. Naturellement, les frotteurs sont isolés du bras qui sert à les manœuvrer. Chaque secteur de la couronne extérieure porte, gravé, un nombre ou une fraction; ces secteurs sont reliés au point de jonction de deux séries de résistances constituant les bras de proportion du pont; le simple déplacement du bras diamétral amène les conducteurs du galvanomètre aux deux points correspondants des deux séries de résistances et, par sa position, indique la valeur du rapport qui peut être 1/100, 1/10, 1, 10 et 100.

Une tige de maillechort bien calibrée et parfaitement étalonnée sert de résistance de comparaison ; un curseur, mobile sur cette tige, sert à faire varier la résistance intercalée et est muni d'une

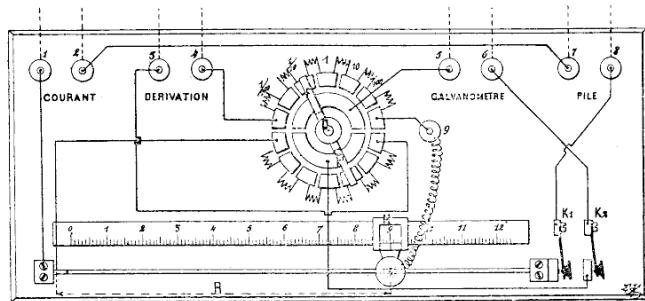


Fig. 153. — Schéma des connexions du pont Carpentier.

fenêtre avec repère qui se déplace au-dessus d'une règle divisée dont la graduation permet de déterminer la valeur de la résistance à mesurer. Les connexions à établir sont des plus simples.

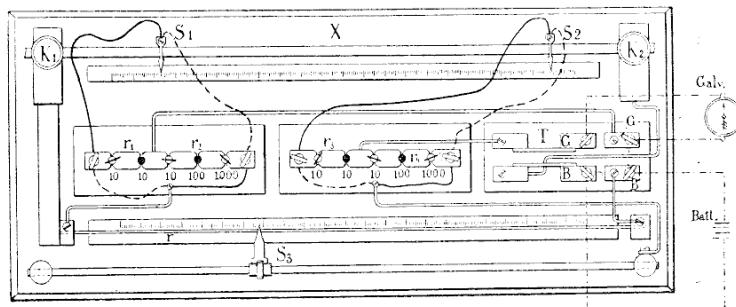


Fig. 154. — Pont double Hartmann et Braun.

On relie les bornes 1 et 2 (fig. 153), marquées « courant », à la résistance à mesurer, en dehors des points où la mesure doit être faite, ces derniers étant en communication avec les bornes 3

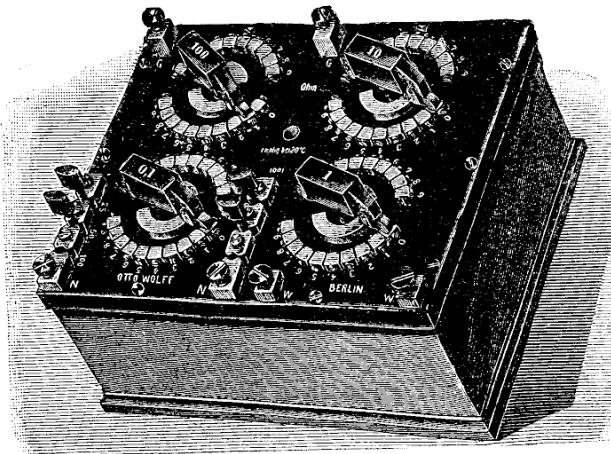
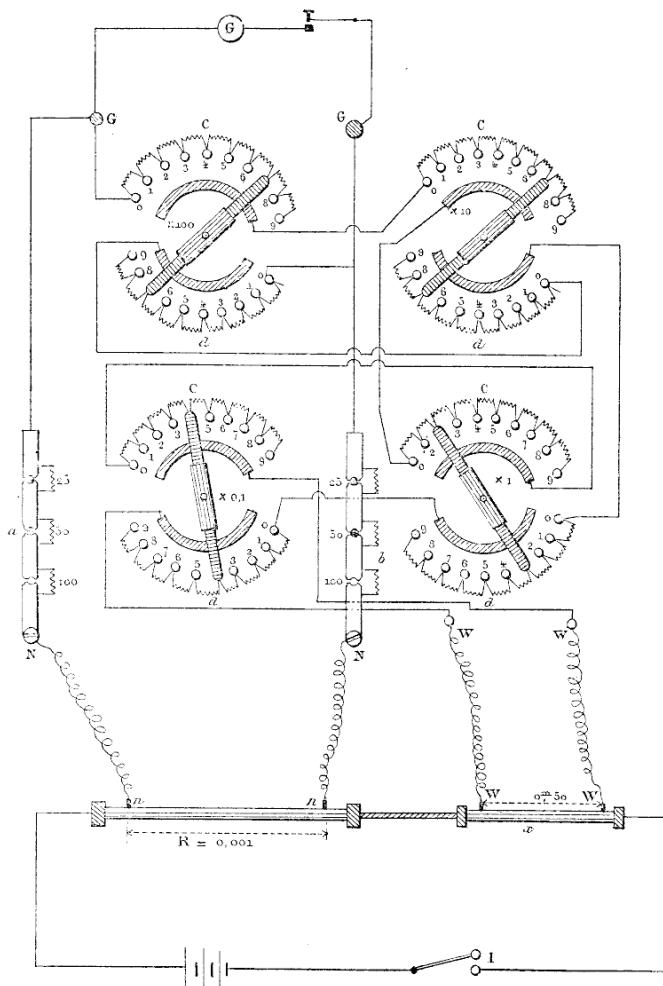


Fig. 155. — Pont double, modèle Otto Wolff.

et 4, marquées « dérivation ». Il n'y a plus alors qu'à amener les conducteurs du galvanomètre et ceux de la pile à leurs bornes respectives 5, 6, 7 et 8. L'équilibre s'obtient, une fois le rapport

convenable des bras de proportion trouvé, en déplaçant le curseur. La résistance mesurée est égale à la valeur de la résistance lue sur la règle en face du repère, valeur que l'on multiplie par le coefficient lu sur le bras diamétral.

Le pont double lord Kelvin, exposé par MM. Hartmann et Braun, de Francfort (Allemagne), est représenté schématiquement sur la figure 134. La résistance à mesurer se fixe entre les bornes K_1 et K_2 ; un galvanomètre très sensible et de faible résistance est relié aux bornes G , G ,



Le pont double de lord Kelvin, du modèle employé par l'Institut de Charlottenbourg, est construit par M. Otto Wolff, de Berlin (fig. 153). On utilise comme résistance de comparaison un étalon R de 0,001 ohm, par exemple (fig. 156), placé à côté de la résistance à mesurer x , le tout étant immergé dans un bain de pétrole. Les deux résistances sont montées en série et parcourues par le même courant d'environ 2 ampères d'intensité par millimètre carré de section de l'échantillon à mesurer. Les bornes n, n de la résistance étalon sont reliées aux bornes N, N du pont; les points W, W , limitant la résistance x à mesurer et distants de 50 cm l'un de l'autre, sont reliés aux bornes W, W du pont.

Lorsque le galvanomètre reste au zéro, on a $x = \frac{c}{d}$, à la condition, toutefois, que, d'autre part, on ait $a = b$ et $c = d$.

Dans le pont que représente la figure 156, a et b sont des résistances ayant respectivement 100, 50 et 25 ohms; on choisit celle qui convient le mieux pour la mesure à effectuer, en ayant soin d'enlever la même cheville en a et en b . On agit alors sur les manettes des quatre décades doubles (centaines, dizaines, unités et dixièmes), jusqu'à ce que l'on obtienne le zéro au galvanomètre. La valeur lue sur les secteurs du haut de chaque décade, par exemple 774,2 (fig. 156), permet de calculer la résistance mesurée par la relation :

$$x = 0,001 \cdot \frac{774,2}{100} = 0,007742,$$

dans laquelle 0,001 est la valeur de la résistance étalon et 100, celle de la résistance intercalée en a et b . La valeur de c est toujours égale à celle de d , puisque les manettes actionnent simultanément deux frotteurs reliant chacun une des séries de plots avec le secteur correspondant.

Pont de Wheatstone-Kirchhoff. — MM. Hartmann et Braun, de Francfort (Allemagne), exposaient un pont de Wheatstone-Kirchhoff (fig. 157), destiné surtout à mesurer la résistance des électrolytes. Il se compose d'un fil de 3 m de longueur servant de pont; la résistance de ce fil peut être découpée à l'aide de deux résistances auxiliaires ayant chacune 4 1/2 fois la valeur de celle du fil et que l'on peut relier ensemble à l'une ou à l'autre extrémité du fil ou bien séparément de chaque côté. Le fil est disposé sur un cylindre en marbre blanc et fait 10 tours; la circonference de ce cylindre est divisée en 100 parties. Une petite roue de contact, montée sur un axe, sert en même temps à faire connaître le nombre de tours du fil mis en circuit. Cinq bobines de résistance, avec enroulement du système Chaperon, ayant respectivement 1, 10, 100, 1000 et 10 000 ohms, servent à établir la proportion convenable d'après la valeur des résistances à mesurer. Le galvanomètre est remplacé par un téléphone qui reste silencieux lorsque l'équilibre est obtenu. Comme source de courant, on utilise les courants fournis par une bobine d'induction.

Pont-téléphone de Nippoldt. — Cet instrument (fig. 158), exposé par MM. Hartmann et Braun, est utilisé pour mesurer la résistance des conducteurs de paratonnerres. Il comporte un télé-

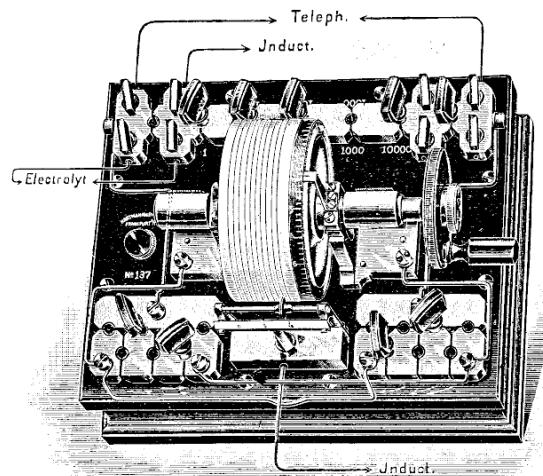


Fig. 157. — Pont de Wheatstone-Kirchhoff.

phone, forme montre, à l'intérieur de la boîte duquel est disposé un fil calibré, servant de pont et sur lequel glisse un contact muni d'un index se déplaçant sur un disque gradué. Une bobine

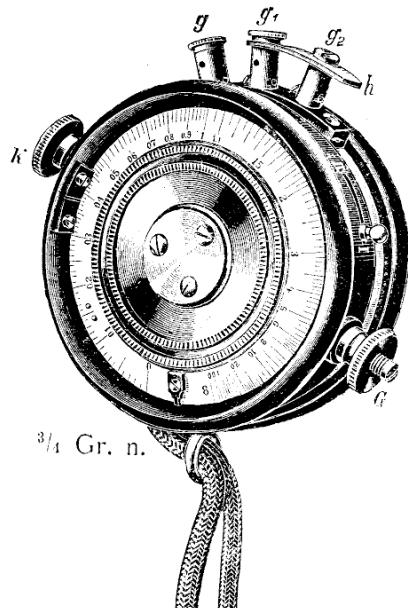


Fig. 138. — Pont-téléphone de Nippoldt.

les lectures doivent être multipliées par 10. Pour remplacer le téléphone par un galvanomètre, il suffit d'enlever la lame de cuivre *h* et de relier les conducteurs du galvanomètre aux bornes *g* et *g*₁.

Pont de Kohlrausch. — Cet instrument (fig. 139), construit et exposé par MM. Hartmann et Braun, de Francfort (Allemagne), se compose d'un fil calibré sur lequel glisse un curseur

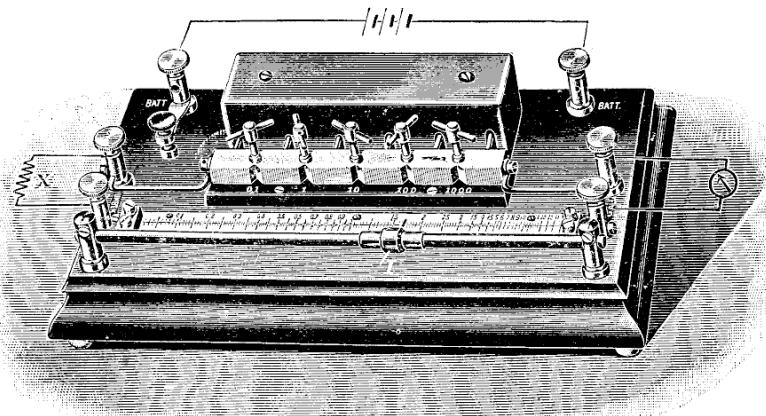


Fig. 139. — Pont de Kohlrausch.

muni d'un index *I* se déplaçant devant une règle graduée en ohms. Cinq bobines de résistance ayant respectivement 0,1; 1; 10; 100 et 1000 ohms permettent d'obtenir la proportion convenable pour la résistance à mesurer; on met en circuit celle de ces résistances qui laisse l'index *I* dans la partie médiane de la graduation. Cet instrument permet de mesurer des résis-

tances depuis 0,05 ohm jusqu'à 20 000 ohms. La valeur de la résistance mesurée est donnée par le nombre lu sur la graduation que l'on multiplie par la valeur de la résistance de comparaison utilisée.

OHMMÈTRES

Ohmmètres Carpentier. — M. Carpentier exposait deux types d'ohmmètres : l'un à circuits fixes, l'autre à circuits mobiles.

L'ohmmètre à circuits fixes présente l'aspect extérieur d'un voltmètre et fonctionne posé à plat.

Les circuits fixes comprennent deux bobines perpendiculaires au centre desquelles se trouve une armature de fer doux montée sur pivots.

Sous l'influence du champ résultant produit par les bobines traversées, l'une par le courant constant de comparaison, l'autre par le courant qui circule dans la résistance à mesurer, l'armature de fer prend une orientation définie par la position d'un index se déplaçant devant une graduation tracée expérimentalement.

Pour que l'aiguille prenne de suite sa position d'équilibre, malgré le manque d'amortissement, une fourchette (fig. 160), mue par un bouton moletté, maintient l'index et ne lui permet

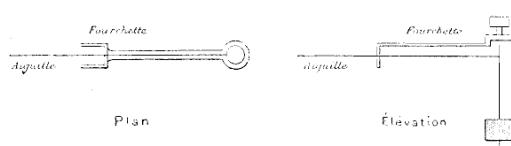


Fig. 160. — Fourchette de l'ohmmètre à circuits fixes, modèle Carpentier.

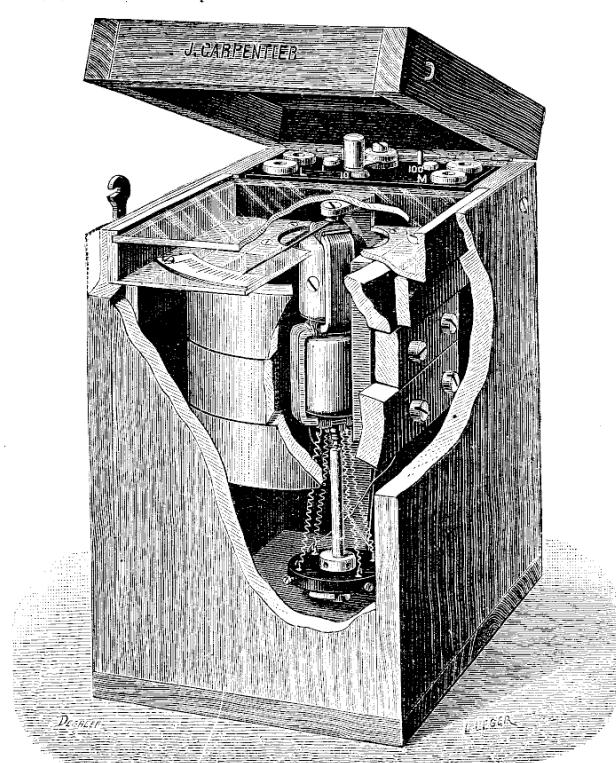


Fig. 161. — Ohmmètre à circuits mobiles, modèle Carpentier.

qu'un faible écart entre les dents de la fourchette. En tournant doucement le bouton moletté, l'aiguille, après avoir adhéré à la fourchette, finit par l'abandonner sans secousses et par prendre sans oscillations sa position d'équilibre.

L'ohmmètre à circuits mobiles (fig. 161) est constitué par deux cadres superposés, placés

à 90° l'un de l'autre et mobiles dans un champ magnétique très intense, créé par des aimants en U; des cylindres de fer doux, concentriques aux cadres mobiles, diminuent la réluctance magnétique.

Le courant est amené aux cadres par des boudins de fil d'argent très fins, que l'on choisit aussi souples que possible afin qu'ils ne fassent pas ressort.

L'un des cadres est relié avec la source de force électromotrice et l'autre est monté en série avec la résistance à mesurer. Dans ces conditions, les deux couples de sens inverse qui agissent sur les cadres sont tous deux proportionnels à la force électromotrice du générateur d'énergie électrique, et l'un d'eux est inversement proportionnel à la résistance à mesurer; l'équipage mobile prend alors la position pour laquelle ces couples sont égaux.

L'équipage mobile, constitué par les deux cadres et par l'aiguille indicatrice, est monté sur pointes et supporté par des chapes en agate.

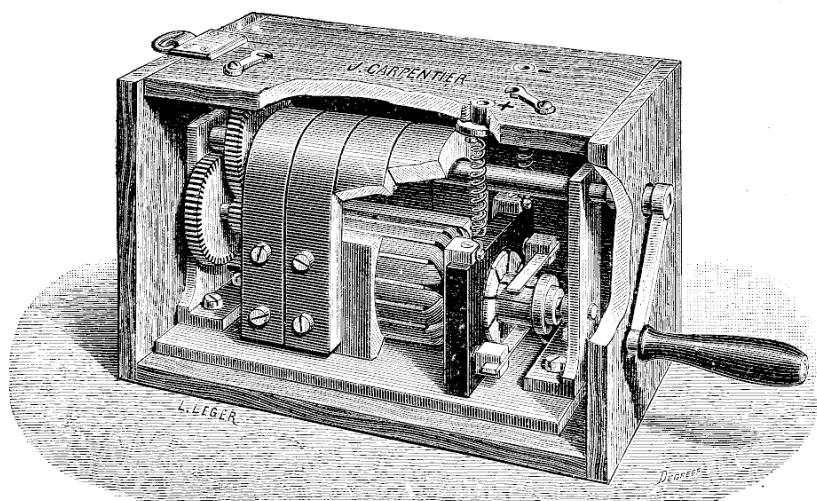


Fig. 162. — Magnéto pour ohmmètre Carpentier.

La graduation de l'instrument va de 100 à 30 000 ohms; mais, au moyen de deux shunts, on peut réduire de 10 ou de 100 fois l'action du cadre en dérivation, ce qui permet de mesurer jusqu'à 3 mégohms.

L'instrument est complété par une petite magnéto à main, pouvant donner un courant continu sous 120 volts à la vitesse angulaire de 100 tours par minute (fig. 162).

Ohmmètre portatif Chauvin et Arnoux. — L'ohmmètre portatif exposé par MM. Chauvin et Arnoux, de Paris (fig. 163), permet de mesurer rapidement et avec précision des résistances comprises entre 0,1 ohm et 20 mégohms. Il peut, par conséquent, être utilisé pour effectuer aussi bien des mesures de résistance ordinaire que des mesures de résistance d'isolation.

Basé sur le principe du pont de Wheatstone, ce qui rend ses indications indépendantes de la valeur absolue et des variations de la force électromotrice du courant employé, cet instrument comporte six bobines de résistance (fig. 164) servant de comparaison et ayant respectivement pour valeur 1, 10, 100, 1 000, 10 000 et 100 000 ohms. Ces bobines peuvent être substituées l'une à l'autre à l'aide d'un curseur C que l'on amène à la main sur l'un des plots correspondant à ces diverses résistances. L'autre bras du pont est constitué par la résistance à mesurer que l'on relie aux bornes X, X'.

Les branches de proportion du pont sont formées par un conducteur très régulièrement roulé sur un cylindre en matière isolante, ce qui permet d'obtenir sur une faible longueur (40 cm) une résistance de plusieurs milliers d'ohms comparable, par conséquent, aux résistances

moyennes à mesurer. Sur ce cylindre-rhéostat et suivant une de ses génératrices, frotte un contact à ressort fixé sur un curseur C, muni d'un index se déplaçant le long d'une règle divisée ayant la même longueur que le cylindre-rhéostat.

Ce contact, en se déplaçant le long du fil du rhéostat, permet de faire varier de zéro à l'infini le rapport des deux résistances, dont la somme est constante et égale à celle du rhéostat entier. Les divisions de la règle portant le curseur sont telles qu'elles font connaître directement et sans calcul la valeur de ce rapport pour chaque position du curseur.

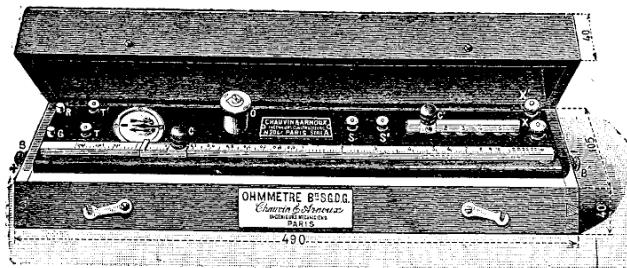


Fig. 163. — Ohmmètre portatif Chauvin et Arnoux.

Le galvanomètre G, employé comme instrument de réduction à zéro, est un galvanomètre apériodique très sensible, à cadre mobile dans un champ magnétique, ce qui dispense d'orienter l'instrument et permet de l'utiliser, même au voisinage des dynamos. Le cadre mobile est suspendu entre deux ressorts en boudin, ce qui donne une sensibilité bien plus grande qu'un montage sur pivots. En outre, le cadre mobile est serti entre deux bagues de cuivre pur qui

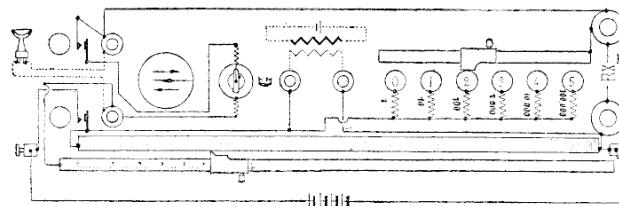


Fig. 164. — Schéma des connexions de l'ohmmètre Chauvin et Arnoux.

constituent un amortisseur électromagnétique puissant. L'équipage mobile est complété par une aiguille indicatrice en aluminium, dont l'extrémité se déplace dans le champ d'une forte loupe ; cette aiguille est pourvue d'une tête de torsion O, qui permet de la ramener facilement à zéro, en face d'un repère. A droite et à gauche de cette ligne de repère, deux flèches, orientées en sens inverse, indiquent dans quel sens il faut pousser les curseurs pour ramener l'aiguille à zéro, lorsqu'un courant traverse le pont.

La sensibilité du galvanomètre est telle qu'une force électromotrice de 15 à 20 volts est suffisante pour effectuer des mesures de résistance d'isolement allant jusqu'à 20 mégohms et de 1 volt, pour des résistances comprises entre 0,1 et 100 ohms.

Généralement, le courant est fourni par une batterie de 12 éléments de pile à liquide immobilisé que l'on peut loger dans une boîte ayant les mêmes dimensions en largeur et longueur que celles de l'instrument, mais de hauteur moitié moindre. Les conducteurs de la pile se relient respectivement aux bornes B, B' placées en dehors de la boîte.

La valeur de la résistance mesurée est donnée par le nombre lu sur la règle divisée, lorsque l'équilibre est obtenu, en ayant soin de reculer la virgule de 0, 1, 2, 3, 4 ou 5 rangs vers la droite, en ajoutant de ce même côté autant de zéros que cela est nécessaire, suivant que l'on a employé l'une ou l'autre des résistances de comparaison qui portent les n° 0, 1, 2, 3, 4 et 5.

Cet ohmmètre peut être employé à la mesure des résistances avec un courant alternatif. Il suffit de substituer à la pile le secondaire d'une bobine d'induction et au galvanomètre un

téléphone ordinaire. Les extrémités du circuit secondaire de la bobine d'induction se fixent dans les bornes S, S' et les fils du téléphone dans les bornes T et T'. Les lectures sur l'échelle divisée se font de la même manière que dans le cas du courant continu, le silence obtenu dans le téléphone correspondant à l'équilibre qui, dans l'autre cas, était indiqué par la position de l'aiguille du galvanomètre sur le zéro.

Naturellement, l'emploi des courants alternatifs et du téléphone ne permet d'effectuer des mesures exactes, correspondant au silence absolu dans le téléphone, qu'à la condition que la résistance à mesurer ne présente pas de capacité appréciable ou qu'une self-induction convenable compense exactement cette capacité.

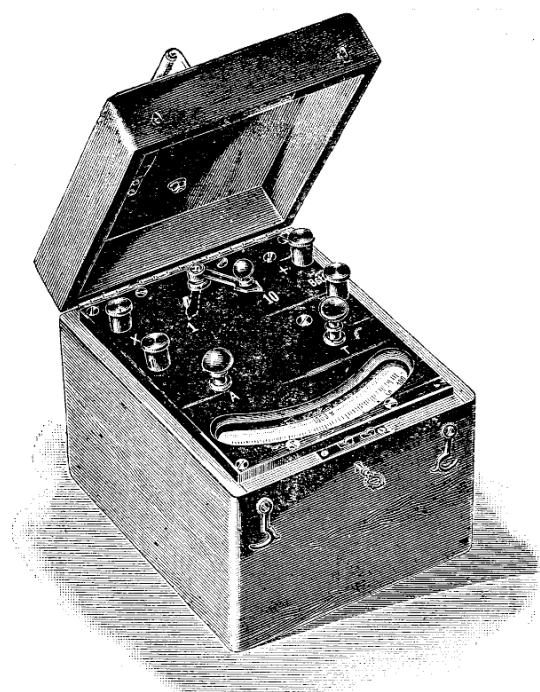


FIG. 165. — Ohmmètre Hartmann et Braun.

droite. Une clé et un mécanisme d'arrêt automatique pour l'équipage mobile du galvanomètre sont, ainsi que la manette du shunt, disposés sur la plaque d'ébonite servant de couvercle. L'instrument, destiné principalement au contrôle de l'isolement des canalisations, permet de mesurer des résistances d'isolement depuis 1 000 ohms jusqu'à 1 mégohm.

Ohmmètre de l'American Electric Specialty Company. — Cette compagnie, de New-York City, exposait un ohmmètre destiné à être mis entre les mains des personnes les moins familiarisées avec les mesures électriques. Cet instrument (fig. 166) se compose d'un pont de Wheatstone avec téléphone.

La boîte de l'instrument contient une pile de quelques éléments à liquide immobilisé et la résistance de comparaison qui est fixe et inaccessible.

On fait varier le rapport des bras de proportion du pont :

1^o Par fractions importantes en déplaçant convenablement la cheville visible à droite sur la figure 166 ;

2^o Par fractions aussi faibles que l'on veut, en promenant un style le long d'un fil métallique tendu entre deux échelles graduées.

Les conducteurs entre lesquels on veut mesurer la résistance d'isolement sont reliés aux bornes X, X', et la cheville est placée entre les plots extrêmes de droite. On fait glisser alors le style le long du fil jusqu'à ce que le téléphone reste silencieux. Si l'on ne peut obtenir ce résultat

tat, on recule la cheville d'un rang vers la gauche et on recommence l'opération. En continuant à déplacer la cheville et le style, on arrive à obtenir le silence dans le téléphone.

La valeur de la résistance d'isolement se lit directement sur l'une des échelles divisées au point qui se trouve en face du style, lorsque le silence du téléphone est obtenu. On lit la valeur de la résistance d'isolement sur l'une ou l'autre des échelles, suivant la position occupée par la cheville.

Pour éviter toute erreur, les plots entre lesquels se place la cheville ont une couleur différente, couleur qui est la même pour les échelles correspondantes.

Lors du transport de l'instrument, le téléphone K se place dans un compartiment ménagé sur la gauche de la boîte et fermé par une porte à coulisse.

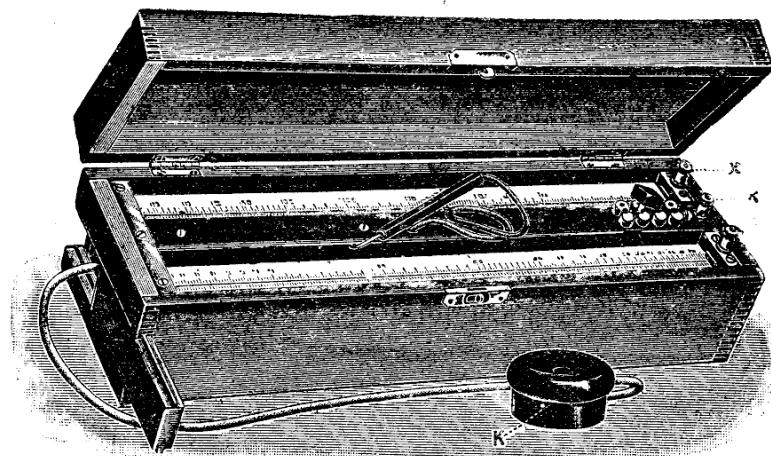


FIG. 166. — Ohmmètre de l'American Electric Specialty Company.

Il se construit quatre modèles d'ohmmètres de ce système :

1^o Ohmmètre à quatre échelles de couleurs différentes, pour des mesures de résistances d'isolement jusqu'à 2 mégohms;

2^o Ohmmètre à quatre échelles pour mesurer jusqu'à 200 000 ohms;

3^o Ohmmètre à trois échelles pour mesurer jusqu'à 200 000 ohms;

4^o Ohmmètre à trois échelles pour mesurer jusqu'à 20 000 ohms.

D'autres modèles d'ohmmètres étaient également exposés, dans la section allemande, par la Société Siemens et Halske, par l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft et par M. Paul Meyer.

Parmi les constructeurs ayant exposé des instruments destinés à mesurer les résistances d'isolement des canalisations d'énergie électrique, nous citerons encore les suivants :

Le Dr P. Meyer, de Berlin, qui exposait un mégohmmètre portatif pour mesurer la résistance d'isolement d'une canalisation à deux conducteurs en charge parcourus par un courant continu de 330 volts.

MM. Hartmann et Braun, de Francfort, exposaient aussi plusieurs modèles d'installations transportables pour mesure de résistances d'isolement, comprenant : galvanomètre, shunt, lunette et échelle, batterie de piles à liquide immobilisé, résistance de comparaison de 100 000 ohms, etc., le tout renfermé dans un coffre en chêne se montant sur trois pieds pliants.

M. J. Carpentier présentait une installation portative avec trépied pliant, composée d'un rhéostat circulaire double avec pont de Wheatstone et d'un galvanomètre Deprez-d'Arsonval réunis dans la même boîte, et une seconde installation, permettant d'appliquer la méthode du galvanomètre étalonné, comprenant un galvanomètre Deprez-d'Arsonval à microscope avec son shunt, une résistance de 100 000 ohms, un commutateur tournant et une clé de galvanomètre.

POTENTIOMÈTRES

On sait que les potentiomètres sont actuellement les instruments qui permettent de mesurer avec le plus de précision les tensions et les intensités des courants continus. De même, les mesures de résistances peuvent s'effectuer avec ces instruments presque aussi facilement qu'avec le pont de Wheatstone et avec autant de précision ; pour la mesure de faibles résistances, ils remplacent avec avantage le pont double de lord Kelvin.

Potentiomètre J. Carpentier. — Dans cet instrument, exposé par M. J. Carpentier, de Paris, on a réalisé une disposition d'ensemble très pratique et qui offre l'avantage de prévenir toute chance d'erreur dans les manipulations.

La résistance du circuit potentiométrique reste parfaitement constante lorsqu'on fait varier celle du circuit de compensation qui le shunte partiellement.

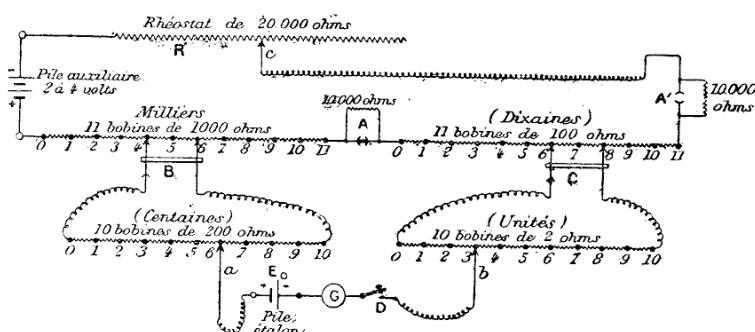


FIG. 167. — Principe du potentiomètre Carpentier.

Cette condition, indispensable pour que le tarage une fois effectué se conserve, est réalisée avec le minimum de bobines. La figure 167 montre le principe de la disposition adoptée.

Le circuit potentiométrique a une résistance totale voisine de 20 000 ohms, pouvant être portée à 40 000 ohms, lorsque la pile constante auxiliaire a deux éléments au lieu d'un.

Ce circuit comprend, comme partie invariable, une série B de 11 bobines de 1 000 ohms, une série C de 11 bobines de 10 ohms et une bobine de 10 000 ohms qu'on peut intercaler en A, entre les séries B et C, ou en A' extérieurement à ces séries.

La partie variable du circuit potentiométrique est constituée par un rhéostat R de 20 000 ohms, dont la résistance utilisée peut varier ohm par ohm.

La série B est munie d'un curseur bipolaire B qui permet de shunter deux bobines consécutives quelconques par une série de 10 bobines de 200 ohms.

La résistance totale de la série B est ainsi ramenée à 10 000 ohms au lieu de 11 000.

La même disposition se retrouve pour la série C, dont deux bobines consécutives sont toujours shuntées par un ensemble de 10 résistances de 2 ohms.

La résistance totale de la série C se réduit donc à 100 ohms.

Le circuit de compensation comprend, montés en série, la pile étalon E_0 , le galvanomètre G et l'interrupteur à clé D. Il est dérivé par les curseurs B, C sur le circuit potentiométrique. Entre les points B et C, la résistance peut varier ohm par ohm, depuis 0 jusqu'à 20 000 ohms.

Voici comment s'obtient cette variation :

En agissant sur le curseur b , on introduit les résistances par unités jusqu'à 10 ohms. Le curseur C permet les variations par dizaines, le curseur a par centaines et le curseur B par milliers d'ohms.

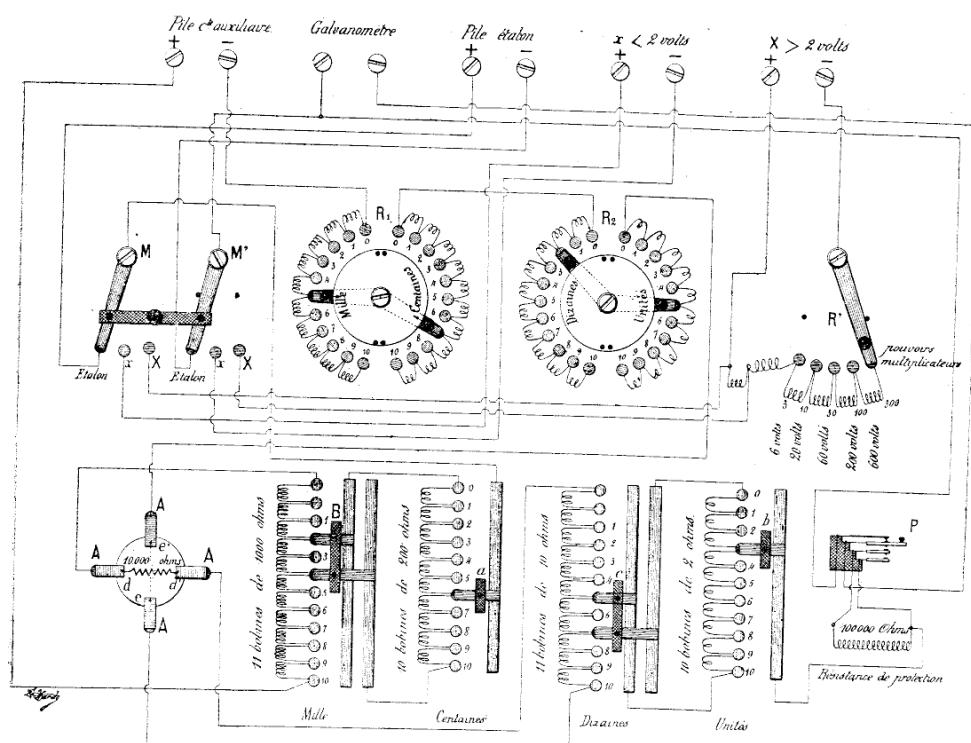


Fig. 168. — Schéma des connexions du potentiomètre Carpentier.

La variation par dizaines de mille est obtenue par la manœuvre de la cheville placée en A ou A'.

Quand on enfonce la cheville en A, la résistance comprise entre les extrémités B, C du circuit de compensation peut atteindre 10 100 ohms et on peut, lorsque l'instrument est taré, mesurer toute tension comprise entre 0 et 1 volt à 0.0001 près.

Si la cheville est introduite en A', la résistance entre B et C peut aller jusqu'à 20 100 ohms et la mesure de tensions comprises entre 1,00 et 2,00 volts peut se faire avec la même approximation que dans le cas précédent.

La disposition qui consiste à shunter deux bobines consécutives quelconques d'une des séries B et C, par un groupe de bobines de même résistance, est celle du pont de Thomson-Varley.

Elle procure l'invariabilité de résistance du circuit potentiométrique, malgré le déplacement des curseurs B, a, C, b, et cela avec 43 bobines seulement dans l'appareil Carpentier.

La figure 168 montre le schéma des connexions du potentiomètre Carpentier.

Le rhéostat, variable ohm par ohm, est représenté par R_1 , R_2 . Il se compose de quatre séries de résistances de 1 000, 100, 10 et 1 ohm, aboutissant à des plots disposés en cadrans sur lesquels glissent des manettes à contacts. La bobine de 10 000 ohms est fixée sur le plateau mobile d'un commutateur AA, AA', qui peut tourner de 90° dans un sens ou dans l'autre.

Cette bobine relie les frotteurs d , d' , tandis que ceux marqués e , e' sont en communication directe.

Il suffit donc d'une rotation d'un quart de tour du commutateur pour que la bobine de 10 000 ohms se trouve intercalée en A ou en A'.

La résistance aux bornes de laquelle est branché le circuit de compensation s'apprécie facilement en observant le commutateur AA' et la position des divers curseurs, en suivant l'ordre A, B, a, C, b, qui correspond en ohms aux dizaines de mille, milliers, centaines, dizaines et unités.

P est la clé du galvanomètre; elle est à contacts successifs. Au repos, la clé est relevée; elle met le galvanomètre en court-circuit, ce qui est commode pour maintenir le spot lumineux au zéro, lorsque le galvanomètre est du système Deprez-d'Arsonval. Le court-circuit cesse dès qu'on appuie sur la clé P.

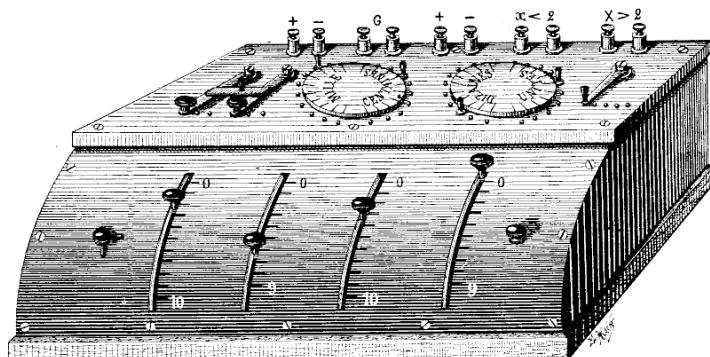


FIG. 169. — Potentiomètre Carpentier.

Si on l'abaisse incomplètement, le galvanomètre se trouve intercalé dans le circuit de compensation, mais à travers une résistance de 100 000 ohms, dite *résistance de protection*.

On évite par ce moyen de détériorer la pile étalon en la laissant débiter, lorsque le réglage du circuit de compensation n'est pas encore parfait. La résistance de protection est mise, d'ailleurs, en court-circuit lorsque la clé P est abaissée à fond.

Le commutateur bipolaire MM', à manettes attelées, sert à introduire dans le circuit de compensation l'élément étalon, une différence de potentiel inconnue x inférieure à 2 volts ou, enfin, une autre X supérieure à 2 volts.

Dans ce dernier cas, la source X débite sur une résistance R' dont une fraction déterminée est branchée sur le commutateur MM'.

Les plots sur lesquels glisse la manette du commutateur R' portent, en chiffres gravés, les facteurs par lesquels il faut multiplier la tension indiquée par le potentiomètre pour avoir la valeur de X. Ces facteurs sont 3, 10, 30, 100 et 300.

Le potentiomètre permettant d'apprécier directement toute tension jusqu'à 2 volts, on place la manette du réducteur R':

Sur le plot 3 pour X inférieur à 3 \times 2 =		6 volts
—	10	— 10 \times 2 = 20 —
—	30	— 30 \times 2 = 60 —
—	100	— 100 \times 2 = 200 —
—	300	— 300 \times 2 = 600 —

La résistance totale du réducteur de tension R' est exactement de 300 000 ohms et la fraction comprise entre les plots $+\text{X}$, $-\text{X}$ du commutateur est nécessairement alors de 1 000 ohms.

Comme l'indique la figure 167, la pile constante auxiliaire, le galvanomètre, la pile étalon et la source x ou X , dont on veut mesurer la tension, se branchent entre les bornes repérées qui leur sont réservées, en ayant bien soin de respecter les polarités marquées sur ces bornes.

Comme pile auxiliaire, on emploie un ou deux accumulateurs ayant donné leur coup de fouet par une décharge partielle préalable.

La figure 169 montre l'aspect extérieur du potentiomètre J. Carpentier. Les manettes des rhéostats R_1 , R_2 sont placées à la partie supérieure sur la planchette horizontale de l'instrument qui ressemble un peu à une machine à calculer. Sur cette partie en ébonite, on voit également le commutateur bipolaire, le réducteur de tension et les diverses bornes.

La partie antérieure est recouverte d'une tôle oxydée qui laisse passer la manette du commutateur de la bobine de 10 000 ohms, les poignées des quatre curseurs B , a , C , b et le bouton P de la clé du galvanomètre.

Cette séparation complète des organes relatifs aux circuits potentiométriques et de compensation est très heureuse. Une fois le tarage effectué, il suffit de manœuvrer les curseurs dont les poignées se déplacent dans des rainures munies de chiffres qui indiquent les résistances correspondant à leur position. On n'est pas exposé de la sorte à toucher intempestivement aux rhéostats R_1 , R_2 , ce qui obligera à recommencer le tarage.

Potentiomètre Chauvin et Arnoux. — Le potentiomètre portatif exposé par MM. Chauvin et Arnoux, de Paris, est de dimensions très réduites. La figure 170 en montre la vue d'ensemble et la figure 171 donne le schéma des connexions.

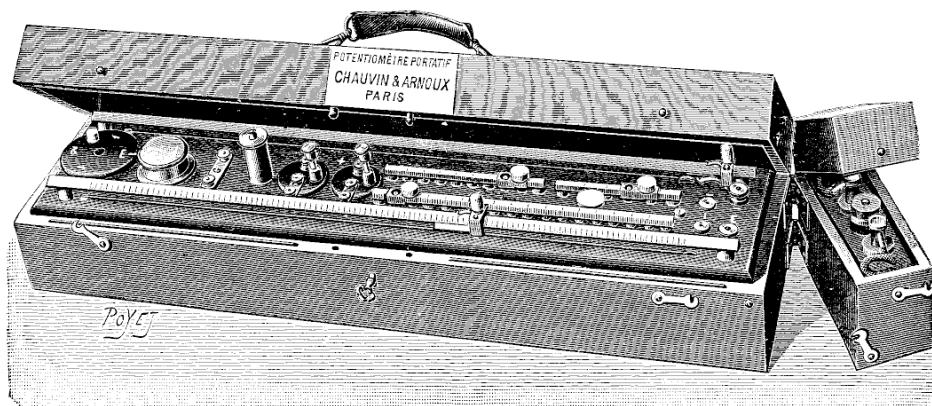


FIG. 170. — Potentiomètre Chauvin et Arnoux.

Le circuit potentiométrique, sur lequel débite un accumulateur, comprend :

1^o Un fil xy en acier-nickel Guillaume, sur lequel peut glisser le curseur D ;

2^o Un fil calibré AA' de 0,50 m de long, sur lequel on déplace le curseur P , dont l'index i se présente devant les divisions d'une règle Q , la règle étant divisée en 1 000 parties. Lorsque l'instrument est taré, la chute de tension est de 0,1 volt pour les 1 000 divisions du fil, soit de 0,0001 volt par division ;

3^o Une série de 15 bobines ayant chacune la même résistance que le fil calibré. Un curseur C_1 les met en relation avec la barre R ;

4^o Une série de 7 bobines identiques aux précédentes et que le curseur C_2 relie à la barre S .

En B se trouve le galvanomètre du genre Deprez-d'Arsonval dont l'aiguille, mobile entre deux repères, s'observe au moyen de la loupe K .

N est un commutateur qui permet d'intercaler dans le circuit de compensation, soit l'une des deux piles étalons $1p$ ou $2p$, soit la source de tension inconnue.

Lorsque cette tension dépasse 16 volts, on fait usage du réducteur de tension VM, dont la résistance totale est de 100 000 ohms et qui permet de mesurer jusqu'à 1 600 volts. Le circuit du potentiomètre est alors dérivé sur une fraction (160 ohms) des 100 000 ohms.

Cette résistance se retire automatiquement du circuit au moyen du commutateur $a_1 c_1 d_1$ lorsque, mesurant de faibles tensions, on amène le curseur M à gauche, jusqu'en a .

Le potentiomètre ne comporte pas de résistance de protection. Pour fermer le circuit de compensation, on maintient abaissée la clé F, après avoir convenablement orienté le commutateur N.

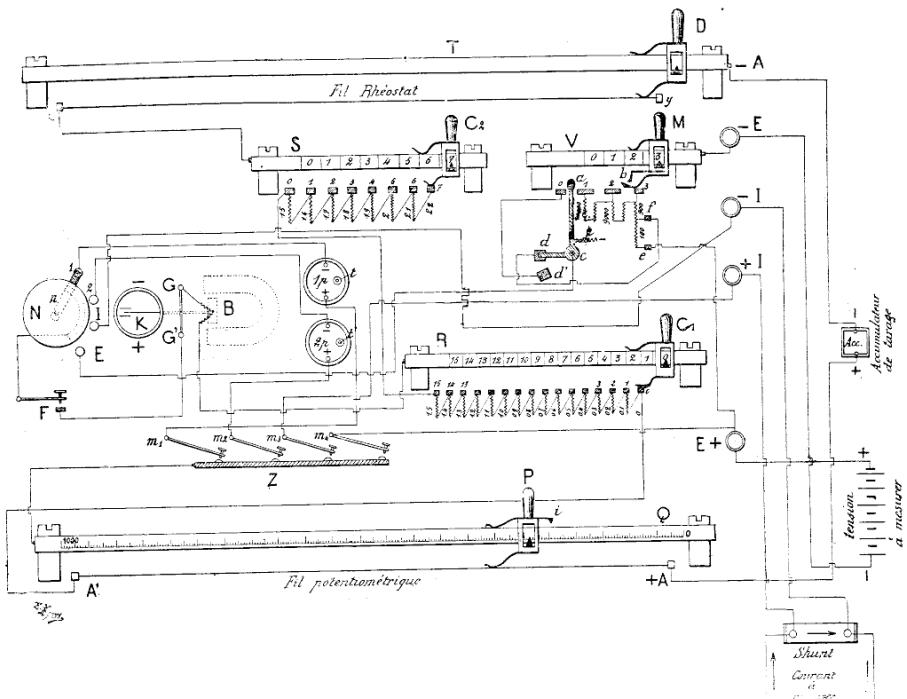


FIG. 171. — Schéma des connexions du potentiomètre Chauvin et Arnoux.

On appuie ensuite par petits à-coups sur l'une des clés m_1 , m_2 , m_3 ou m_4 .

La tension inconnue se relie aux bornes $+ E$, $- E$.

Les bornes $+ I$, $- I$ aboutissent à celles d'un shunt, dans lequel circulent les courants dont on veut mesurer l'intensité, tandis que la pile auxiliaire est branchée entre les bornes $+ A$, $- A$.

Il est à noter que la règle Q porte une seconde échelle, dite de correction de température.

Avant de tarer le potentiomètre, on amène l'index i devant la température marquée sur cette échelle, après avoir observé le thermomètre des éléments Clark $1p$, $2p$.

Le tarage s'obtient en plaçant les curseurs C_1 , C_2 sur les plots qui indiquent les deux premières décimales de la tension étalon. On agit sur le rhéostat D de manière à annuler les déviations du galvanomètre.

Supposons que, dans une mesure de tension inconnue, appliquée aux bornes $+ E$, $- E$, on soit arrivé à l'équilibre du galvanomètre en plaçant le réducteur M sur le plot 2, les curseurs C_1 , C_2 sur les plots 15 et 0 et le curseur P devant la division 364.

On écrira le nombre 1,5364 et on déplacera la virgule de deux rangs vers la droite, le réducteur M indiquant ce nombre de rangs. On obtiendra alors le nombre 153,64, qui indique en volts la tension cherchée.

Potentiomètre Carrenza. — Cet instrument, étudié pour la marine espagnole par M. Carrenza, est construit en France par la maison Breguet qui l'avait exposé.

La figure 172, qui montre les détails de construction, fait voir que la résistance du circuit potentiométrique est entièrement constituée par un fil calibré roulé en hélice sur un cylindre isolant.

Le fil est en métal spécial, dont la résistivité très considérable est de 85 microhms-centimètre et dont le coefficient de variation de température est seulement de 0,000867; son diamètre est de 0,33 mm.

Ce fil est logé dans une rainure hélicoïdale, pratiquée sur le cylindre isolant, de façon à n'être que partiellement encastré.

Parallèlement au cylindre se trouve une vis micrométrique de même pas que l'enroulement du fil.

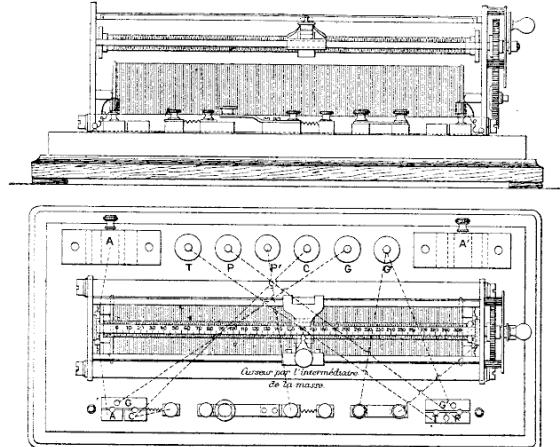


FIG. 172. — Schéma des connexions du potentiomètre Carrenza. FIG. 173. — Tarage du potentiomètre Carrenza.

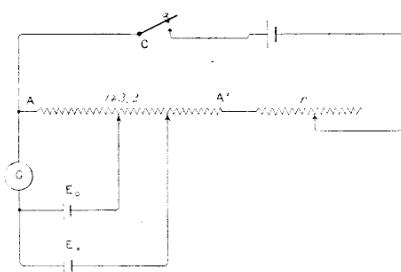


Fig. 473. — Tarage du potentiomètre Carranza.

peut être embrayé ou débrayé, suivant que l'on veut donner au chariot porte-contact des déplacements lents ou rapides.

Au-dessus du cylindre est une règle graduée dont les divisions correspondent au nombre de spires qu'il comporte.

De plus, l'axe du cylindre est muni d'une aiguille mobile devant les divisions d'un cadran indiquant les fractions de spire.

Le contact possède un ressort destiné à limiter la pression exercée sur le fil calibré lorsqu'on appuie sur le bouton de manœuvre de ce contact.

L'ensemble est complété par des connexions aboutissant à une série de bornes étiquetées, ce qui rend très aisée la mise en service de l'instrument, tout en évitant les erreurs de groupement.

D'ailleurs, des fils fusibles sont disposés sur le trajet du circuit, lorsquell'appareil est soumis à une tension élevée.

Pour graduer le potentiomètre, on opère comme suit : le fil calibré AA' du potentiomètre (fig. 173) est monté en série avec un rhéostat de réglage d'une centaine d'ohms, indépendant de l'instrument ; dans ce circuit on fait débiter une pile constante donnant environ 2 volts.

On dispose en G un galvanomètre sensible, une clé G et un élément Latimer-Clark E_g.

Soit 1,434 volt sa force électromotrice, toute correction de température effectuée. On amène le contact mobile devant la division 143 de la règle, qui correspond à 143 spires du cylindre. L'aiguille de ce dernier est placée sur la division 4 du cadran qui correspond à 0,4 spire. Le fil potentiométrique comprend donc 143,4 spires, soit 10² fois la tension de l'élément Latimer-Clark. Il ne reste plus qu'à manœuvrer le rhéostat *r* jusqu'à ce qu'en abaissant la clé du galvanomètre ce dernier reste au zéro.

Le potentiomètre est ainsi gradué et l'on peut, en plaçant en E_x une différence de potentiel inconnue (inférieure à 2 volts), en déterminer la valeur.

Pour cela, on ne touche plus au rhéostat r et l'on enlève la pile étalon E_0 . On fait tourner le cylindre jusqu'à ce qu'en appuyant sur le bouton du chariot porte-contact, le galvanomètre reste au zéro. Il reste à lire le nombre de spires et les fractions de spire indiqués sur la règle et sur le cadran.

Supposons qu'on ait trouvé, par exemple, que la règle marquait 113 spires et le cadran 0,7 spire : c'est que la tension inconnue a pour valeur $113,7 \cdot 10^{-2} = 1,137$ volt.

Le cylindre comportant 200 spires, on peut mesurer directement des tensions inférieures à 2 volts.

Lorsqu'on veut mesurer des tensions supérieures à 2 volts et comprises, par exemple, entre 2 et 150 volts, on les fait débiter sur une résistance de 100 000 ohms. On amène au potentiomètre, en E_x , une dérivation prise aux bornes des 1 000 premiers ohms de la résistance précédente.

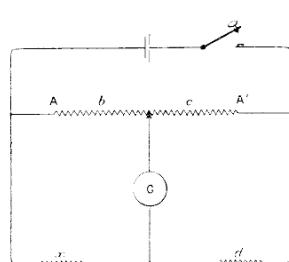


FIG. 174. — Dispositif employé pour mesurer les résistances avec le potentiomètre Carrenza.

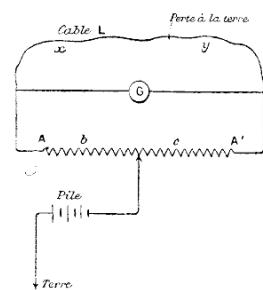


FIG. 175. — Emploi du potentiomètre Carrenza pour déterminer les pertes à la terre dans un câble.

La tension, mesurée comme précédemment, devra nécessairement être multipliée par 100.

Les mesures d'intensité s'effectuent par la méthode indirecte, en déterminant avec le potentiomètre la chute de tension qui se produit aux bornes d'un shunt de 0,001 ohm, traversé par le courant à mesurer.

Pour mesurer des résistances et des isolements, on emploie la méthode du pont de Wheatstone. Le potentiomètre de Carrenza peut être utilisé à cet effet, et il n'est même plus besoin de le graduer.

On place en x la résistance à mesurer et en d une résistance connue et du même ordre de grandeur. Le galvanomètre étant branché en b , comme l'indique la figure 174, on déplace le chariot porte-contact jusqu'à ce qu'en appuyant sur la clé c le galvanomètre reste au zéro.

Il ne reste plus qu'à appliquer la relation bien connue :

$$x = d \frac{b}{c};$$

b est indiqué par le potentiomètre et $c = n - b$, n étant le nombre total des spires du cylindre. On peut encore utiliser le potentiomètre de Carrenza pour déterminer la position d'une perte à la terre existant dans un câble de section constante.

Il suffit de réaliser le montage indiqué par la figure 175. Soit l la longueur du câble et x la distance du défaut à l'une des extrémités de ce câble. On a, lorsque le galvanomètre reste au zéro :

$$x = l \frac{b}{b + c} = l \frac{b}{n}.$$

La distance y du défaut à l'autre extrémité du câble serait de même :

$$y = l \frac{n}{b}.$$

Potentiomètre Hartmann et Braun. — Cet instrument (fig. 176), construit et exposé par MM. Hartmann et Braun, de Francfort (Allemagne), se compose d'un circuit potentiométrique RCK_1LK_2 (fig. 177) aboutissant aux bornes $+B$, $-B$, auxquelles on relie la source dont on veut déterminer la tension ou, suivant les cas, une pile auxiliaire.

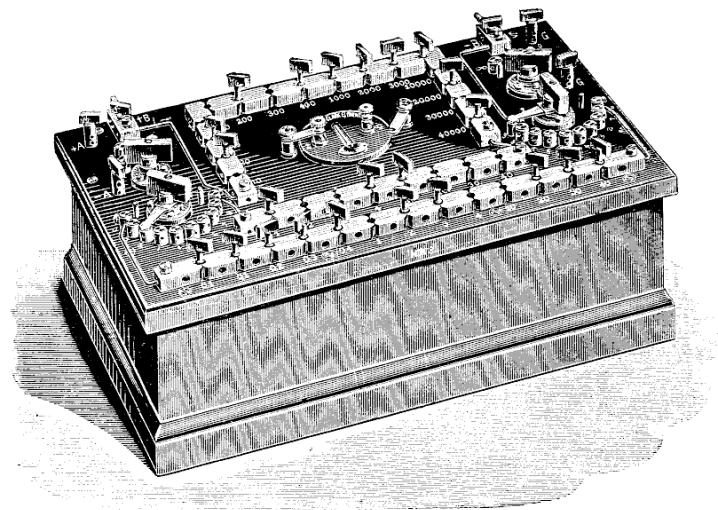


Fig. 176. — Potentiomètre Hartmann et Braun.

La partie R , formée d'une boîte de résistances à chevilles, peut atteindre 111 100 ohms. La branche C a 110 ohms, la série K_1 comprend 9 bobines de 100 ohms, la branche L a 111,1 ohms et, enfin, la série K_2 se compose de 9 bobines de 1 000 ohms.

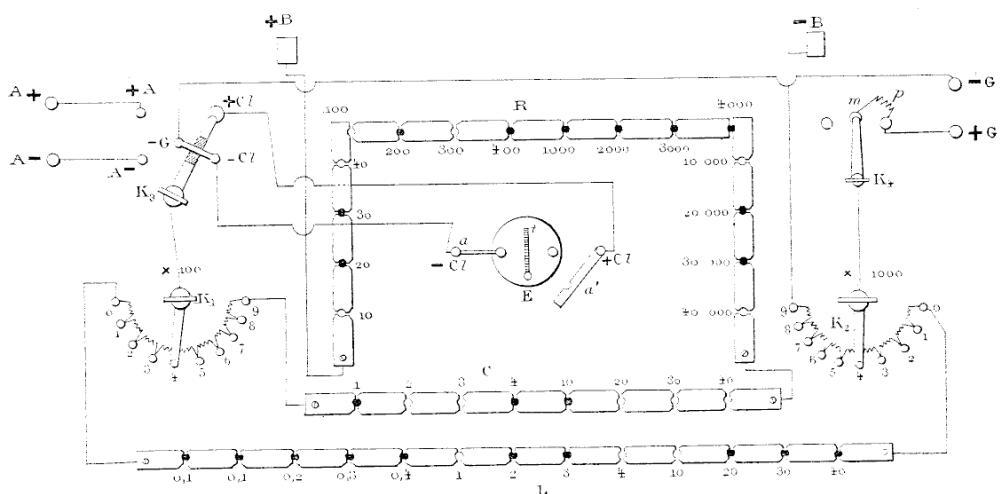


Fig. 177. — Schéma des connexions du potentiomètre Hartmann et Braun.

Les branches C et L sont *complémentaires*, c'est-à-dire que toute cheville retirée de C doit être reportée entre les plots correspondants de L et inversement.

La résistance maximum comprise entre $+B$ et $-B$ peut donc être, au total, de 121 111,1 ohms.

Le circuit de compensation comprend le galvanomètre, branché en $+$ G, $-$ G, et la pile étalon Clark, reliée aux bornes $+$ Cl, $-$ Cl. Cet ensemble aboutissant aux manettes de K_1 et de K_2 peut, par conséquent, être dérivé sur un maximum de 10 000 ohms, variable par dixième d'ohm et pris sur le circuit potentiométrique.

La manette K_3 permet d'intercaler l'élément Clark ou de lui substituer une source de tension branchée entre $+$ A et $-$ A.

La manette K_4 sert à introduire le galvanomètre en circuit, en passant, au préalable, à travers une résistance de protection p de 100 000 ohms.

La disposition complémentaire des branches C et L a pour objet de permettre toutes les variations de résistance comprises entre les extrémités du circuit de compensation sans que la résistance du circuit potentiométrique en soit affectée. Cette disposition est nécessaire pour ne pas modifier le tarage lorsqu'on fait une série de mesures.

L'élément Clark E est placé dans la caisse de l'instrument; mais on peut l'enlever et l'employer à d'autres usages.

Cet élément est muni d'un thermomètre grâce auquel on corrige aisément la valeur de la force électromotrice en fonction de la température. C'est pour tenir compte de cette correction que la branche L comprend des résistances de 0,1 à 0,4 ohm que ne comporte pas la branche C.

Le commutateur K_3 est formé d'une lame élastique dont l'axe de rotation est en K_3 et qui sert à relier successivement ce point aux plots $+$ Cl et $-$ A.

Une petite lame élastique transversale, isolée de la précédente, mais solidaire de ses mouvements, fait communiquer en même temps le plot $-$ G aux plots $-$ Cl ou $+$ A.

Ce potentiomètre permet de mesurer toutes tensions comprises entre 0,014 et 1 400 volts.

Pour les mesures d'intensité de courant, on emploie la méthode de la chute de tension, en utilisant des shunts étalonnés intercalés dans les circuits étudiés. Avec des shunts convenables, l'étendue des mesures d'intensité va de 0,1 milliampère à 1 000 ampères.

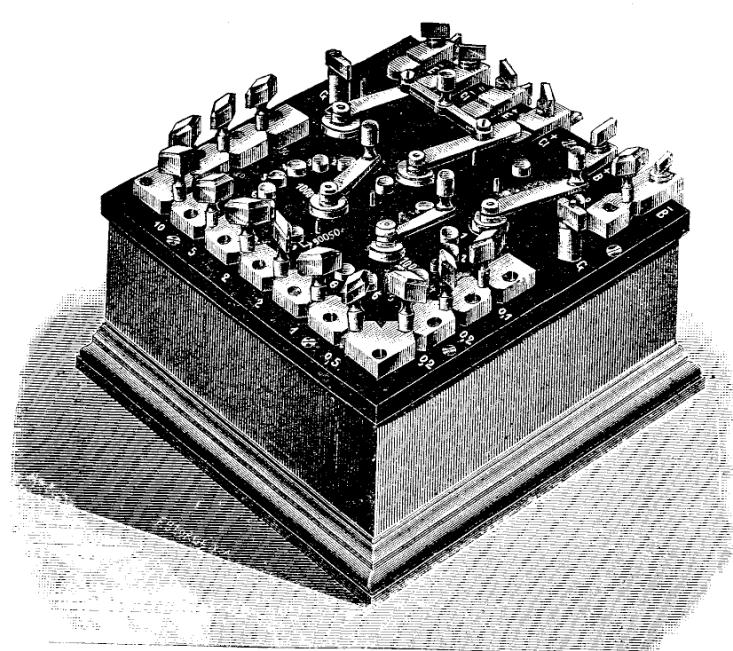


Fig. 178. — Potentiomètre Keiser et Schmidt.

Potentiomètre Keiser et Schmidt. — Dans cet instrument (fig. 178), construit et exposé par MM. Keiser et Schmidt, de Berlin (Allemagne), on retrouve quelques dispositions du poten-

mètre Hartmann et Braun, ces divers instruments étant établis d'après les types étudiés par M. Feussner à l'Institut de Charlottenbourg.

La figure 179 donne le schéma des connexions.

Le circuit potentiométrique a une résistance totale de 90 050 ohms, dont 80 000 sont branchés entre les plots — B et + B.

Le circuit de compensation, qui se termine par les manettes K_1 et K_2 , peut être dérivé sur les résistances disposées en cadrans D_1 et D_2 et sur la rangée R.

Ces résistances varient, au besoin, par fraction de 0,1 ohm et valent en totalité 10 000 ohms.

La pile étalon se relie aux bornes + Cl, — Cl et les tensions à mesurer en + E, — E, lorsqu'elles sont inférieures à 10 volts ; mm' est le commutateur bipolaire employé dans les appareils

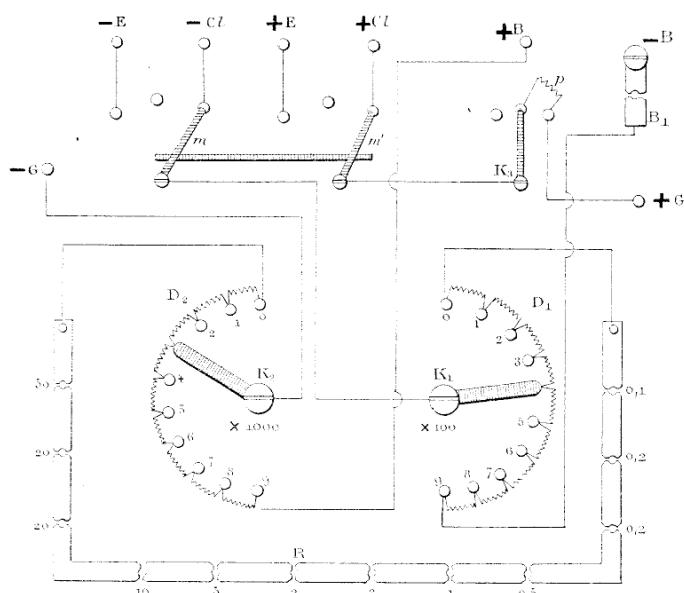


Fig. 179. — Schéma des connexions du potentiomètre Keiser et Schmidt.

déjà décrits et K_3 est l'interrupteur du galvanomètre. Une résistance p , de 400 000 ohms, protège l'élément étalon.

Pour tarer le potentiomètre Keiser et Schmidt, on dispose les manettes K_1 , K_2 et les chevilles en R, de façon à intercaler entre les points K_1 , K_2 une résistance égale à 1 000 fois la tension de la pile étalon, toutes corrections de température effectuées.

On opère comme avec les appareils précédents, en branchant entre les bornes + B, — B la batterie auxiliaire de piles constantes.

Les tensions se mesurent à partir de 0,01 volt et jusqu'à 200 volts sans faire intervenir de résistances supplémentaires.

Avec les résistances supplémentaires, il est possible de mesurer jusqu'à 1 000 volts.

Si on emploie une série convenable de shunts, on peut mesurer les intensités comprises entre 0,001 et 1 000 ampères.

L'approximation atteint 0,1 %.

Potentiomètre Otto Wolff. — La maison Otto Wolff est le constructeur attitré de l'Institut physico-technique de Charlottenbourg ; aussi ce potentiomètre (fig. 180) est-il le véritable type du potentiomètre officiel allemand. Il se compose de cinq séries de résistances disposées en cadrans, comme le montre la figure 181 donnant le schéma des connexions.

Les cadrans A, A' sont simples et contiennent : le premier, 14 bobines de 1 000 ohms, et le second, 9 bobines de 100 ohms. Les trois autres séries sont formées de cadrans doubles CC', DD', EE'. Chaque cadran possède 9 bobines qui ont 10 ohms pour les cadrans CC', 1 ohm pour les cadrans DD' et 0,1 ohm pour les cadrans EE'. Les deux manettes de chaque cadran double sont isolées l'une de l'autre, mais manœuvrées simultanément. De cette façon toute résistance ajoutée en C est retirée en C'; le même fait se produit pour celles des cadrans DD', EE'.

Cette disposition a pour objet de maintenir constante la résistance totale comprise entre les points + B, — B, malgré les variations de la résistance du circuit de compensation relié aux secteurs a , a' des cadrans simples A, A'.

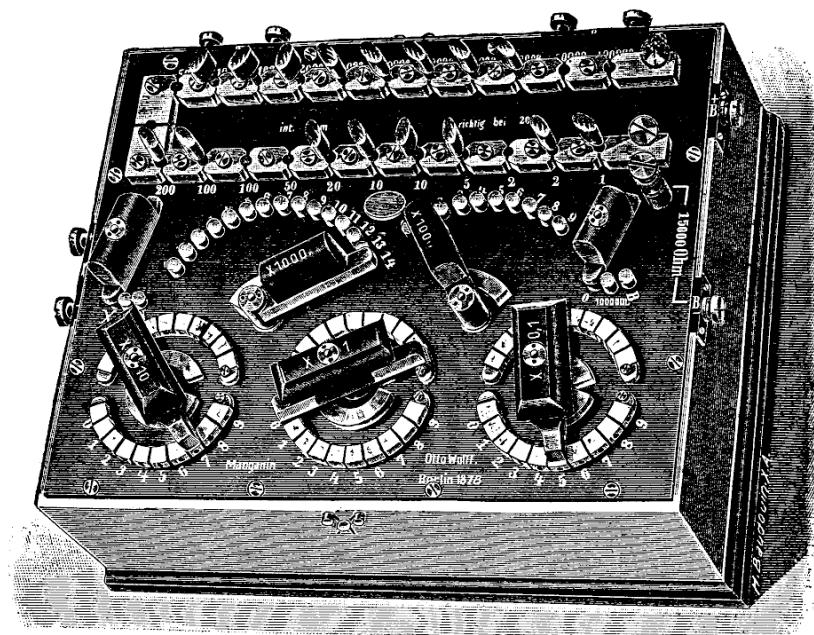


Fig. 180. — Potentiomètre Otto Wolff.

Entre les points + B, — B, la résistance est invariable et comprend, par suite, 14 bobines de 1 000 ohms, 9 bobines de 100 ohms et 9 bobines de 10 ohms, 9 de 1 et 9 de 0,1 ohm, soit, au total, 14 999,9 ohms. Quant aux bobines de 10, 1 et 0,1 ohms, celles qui ne sont pas empruntées aux cadrans inférieurs le sont aux cadrans supérieurs et inversement.

La résistance du circuit de compensation peut aussi atteindre 14 999,9 ohms ; mais elle est susceptible de varier par fractions de 0,1 ohm.

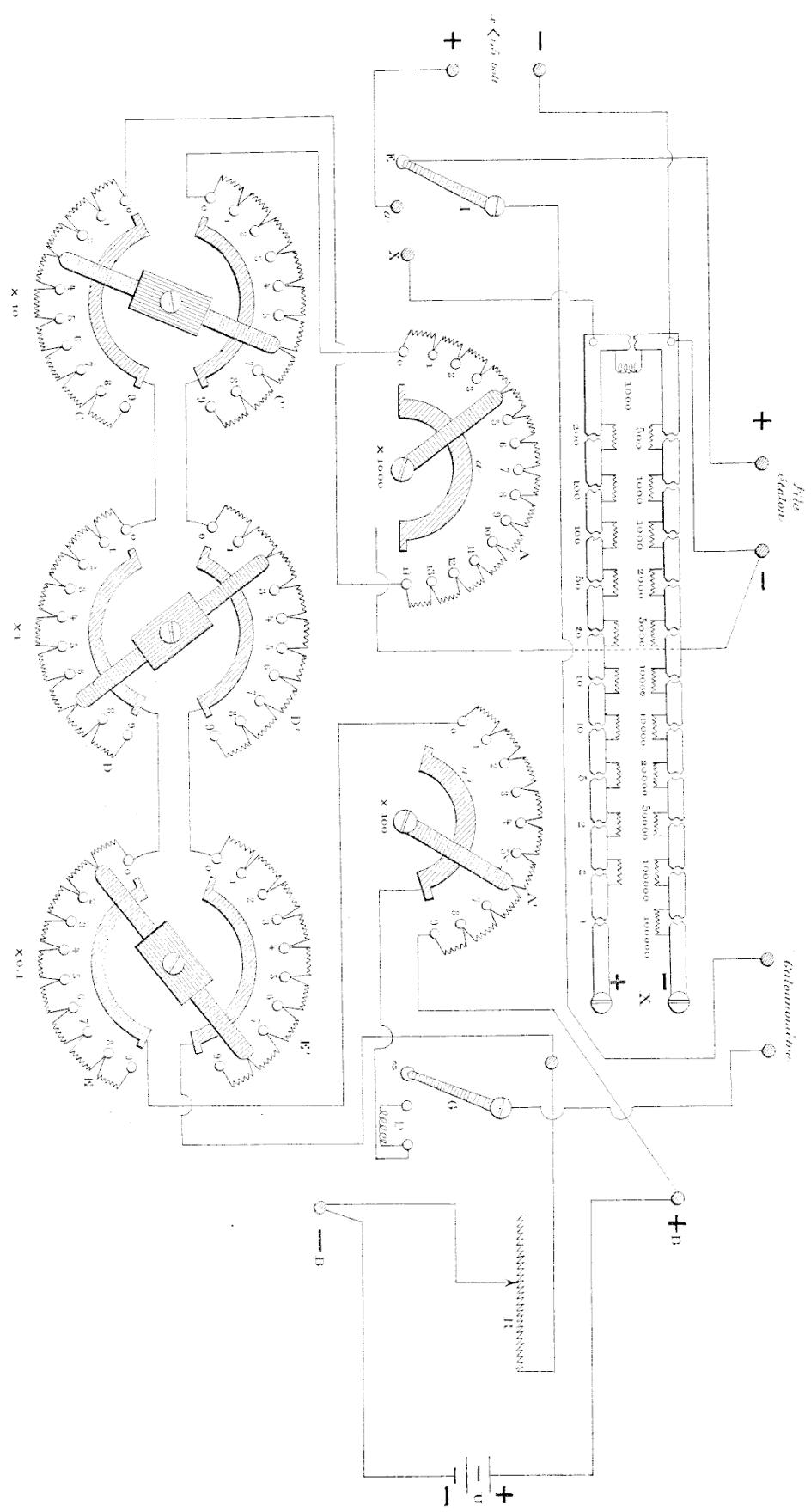
Lorsque le tarage est effectué, la différence de potentiel fournie entre + B et — B par la pile auxiliaire est exactement de 1,49999 volt, ou pratiquement 1,5 volt ; la chute de tension aux bornes de chaque dixième d'ohm est alors de 0,00001 volt.

Le rhéostat R, extérieur au potentiomètre, permet d'arriver toujours au tarage exact en opérant de la façon précédemment décrite.

I est, comme on le voit, le commutateur qui sert à relier le galvanomètre à la pile étalon ou à une source inconnue x , inférieure à 1,5 volt, ou enfin à une source X comprise entre 1,5 et 600 volts.

Dans ce dernier cas, la tension inconnue est branchée entre les bornes + X et — X d'un réducteur ayant une résistance de 300 000 ohms.

G est l'interrupteur du galvanomètre, et P la résistance de protection.



On remarquera que les cadrans C, D, E sont montés en série, entre les cadrans A, A'; ils font donc partie du circuit de compensation.

Les cadrans C', D', E' sont extérieurs aux points a, a' et appartiennent au circuit potentiométrique.

En réalité, lorsqu'on fait les mesures, les lectures ne portent que sur les cadrans AA', CDE.

Pour ne pas commettre d'erreur, il faut se rappeler qu'il n'y a pas de lecture à effectuer sur les cadrans C', D', E'. A cet effet, le constructeur a supprimé les chiffres relatifs à ces cadrans; nous ne les avons fait figurer sur le schéma que pour mieux faire comprendre l'artifice employé pour maintenir constante la résistance du circuit potentiométrique.

La disposition dérivée du pont de Thomson-Varley paraît cependant préférable, car elle permet d'économiser un certain nombre de bobines dont l'étalonnage précis est nécessairement coûteux.

Potentiomètre Siemens et Halske. — Dans ce potentiomètre, combiné par le Dr Raps et que représentent les figures 182 et 183, on a également employé la disposition du pont de Thomson-Varley afin de réduire le nombre des bobines.

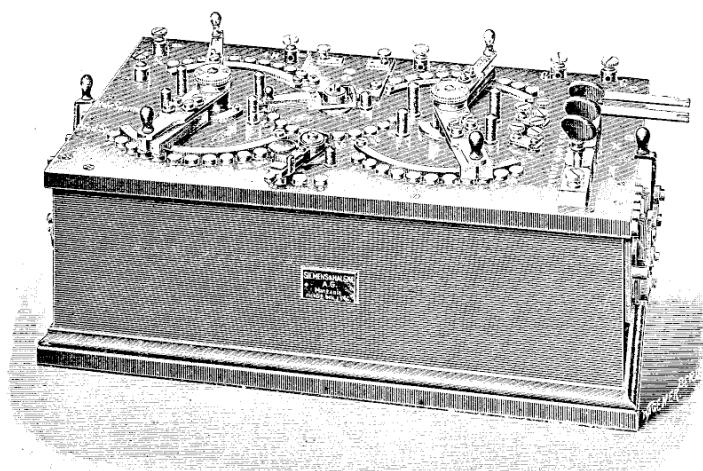


Fig. 182. — Potentiomètre Siemens et Halske.

Entre deux quelconques des 10 bobines de 1 000 ohms de la série K (fig. 183), on dérive une résistance fixe, formée de 9 bobines de 100 ohms, dont l'ensemble, soit 900 ohms, aboutit aux deux frotteurs dont se compose la manette K.

La série K, ainsi shuntée, présente donc une résistance réduite de 9 900 ohms.

La série K², qui comprend 10 bobines de 10 ohms, a de même l'une quelconque de ses bobines shuntée par 9 bobines de 1 ohm. Une série B de 9 bobines de 0,1 ohm complète cet ensemble, dont la résistance totale, de 10 000 ohms, constitue le circuit potentiométrique.

Le circuit de compensation peut varier de 0,1 à 10 000 ohms, par dixième d'ohm: il aboutit aux manettes K¹, K³.

La pile auxiliaire se place entre les bornes + H et - H et la pile étalon en W.

Cette pile est dérivée sur l'une des résistances marquées 10 200, 1 020, 102, en enlevant la cheville de l'une de ces résistances.

De cette manière et tout en ne faisant pas débiter la pile étalon, on oppose une fraction plus ou moins grande de sa tension (1,02 volt) aux points K¹, K³, auxquels aboutit le circuit de compensation.

Suivant les cas, la chute de tension aux bornes de chaque dixième d'ohm est donc de 0,0001, de 0,001 ou de 0,01 volt.

Comme toujours, on ne ferme le circuit de compensation qu'au travers d'une résistance de protection ; elle est ici intercalée entre les plots de l'interrupteur T, qui porte une petite clé à contact, nommée *tâter*. Pour les mesures de faibles tensions, on réunit directement les bornes A, A', terminées par des bandes de connexions qui servent à relier les bornes A, A' à travers une résistance de 150 000 ohms, lorsqu'on applique en + X, — X des tensions élevées.

Dans ce dernier cas, on dispose les commutateurs L, L', U, de manière à réaliser la combinaison indiquée en traits forts sur la figure 183.

Les connexions en traits fins sont relatives à la mesure des faibles tensions et au tarage du potentiomètre. On remarquera que certaines connexions sont communes dans les deux cas ; elles ont été représentées, à cet effet, par des traits fins longeant les traits forts.

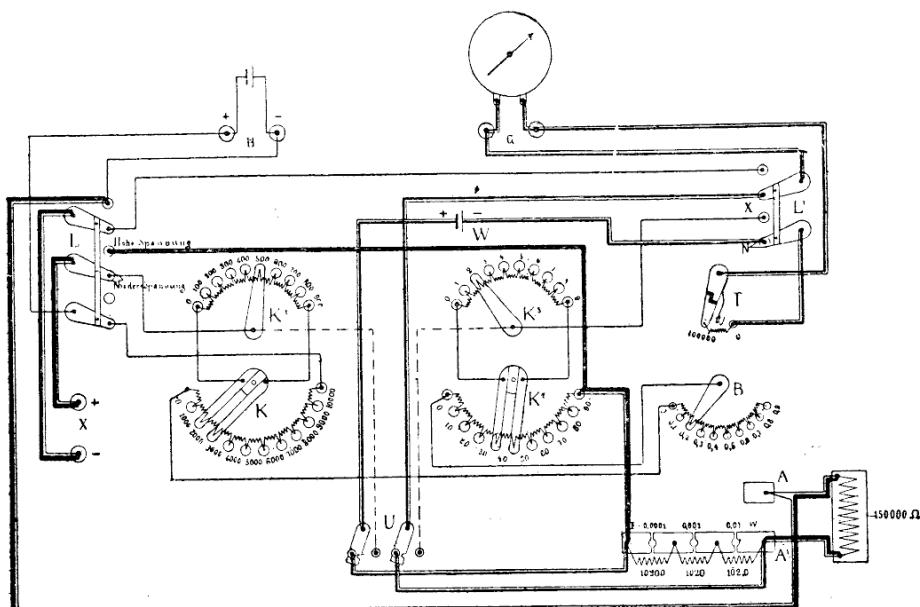


FIG. 183. — Schéma des connexions du potentiomètre Siemens et Halske.

La pile étalon est l'élément Weston, au cadmium ; il est logé dans la caisse du potentiomètre.

Les mesures de tensions peuvent s'effectuer entre 0,0001 et 1 500 volts si l'on se sert du rhéostat intercalé entre les bornes A, A'.

Potentiomètre Crompton. — Cet appareil est représenté, dans son ensemble, par la figure 184, accompagné de tous ses accessoires, boîte auxiliaire, pile étalon, galvanomètre et échelle transparente.

La figure 185 indique les connexions du potentiomètre, qui comprend :

1° Un fil calibré 0 — 100 d'environ 63 cm de long, tendu au-dessus d'une règle divisée en 1 000 parties et le long de laquelle se déplace un curseur B, portant une clé de contact avec le fil.

Ce dernier, de 0,4 mm de diamètre, a une résistance de 2 ohms et son coefficient de température est négligeable ;

2° En série avec le fil calibré, sont disposées 14 bobines O à A de 2 ohms chacune, intercalées entre les plots d'un commutateur à manette.

La résistance fixe du circuit potentiométrique est de 30 ohms. Elle est complétée par un rhéostat qui en forme la partie variable. La pile constante auxiliaire est branchée entre les extrémités du circuit potentiométrique et le rhéostat est réglé pendant le tarage de façon que la chute de tension aux bornes de l'ensemble du fil calibré et des 14 bobines de 2 ohms soit exactement de 1,5 volt. La différence de potentiel aux extrémités du fil est alors 0,1 volt et à chacune des 1 000 divisions correspond 0,0001 volt.

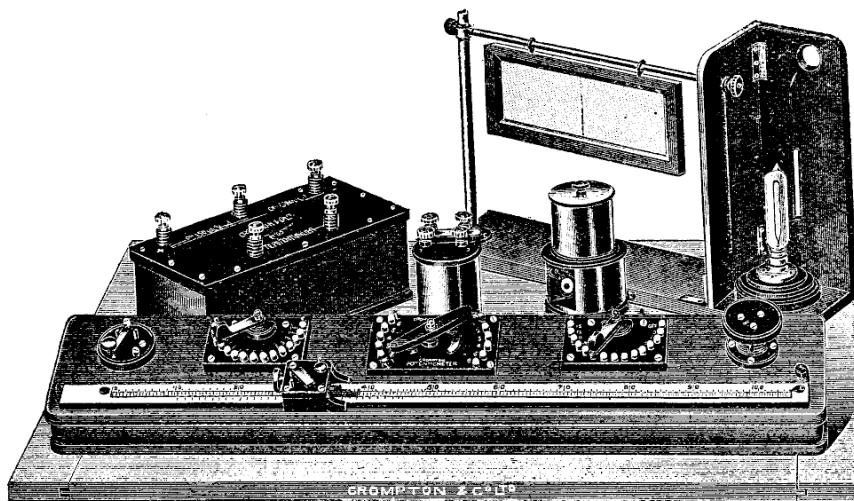


FIG. 184. — Potentiomètre Crompton.

Le circuit de compensation comprend le galvanomètre *G* et la pile étalon qui se branche entre le curseur *B* et la manette du commutateur des 14 bobines.

Soit 1,434 volt la force électromotrice de la pile étalon. On place la manette du commutateur sur le plot 14 et le curseur devant la division 340 de la règle.

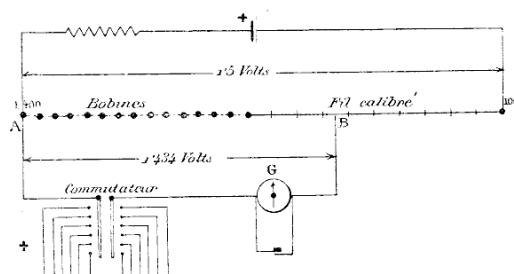


FIG. 185. — Schéma des connexions pour le tarage du potentiomètre Crompton.

Il ne reste plus qu'à agir sur le rhéostat jusqu'à ce qu'en appuyant sur la clé du curseur le galvanomètre reste au zéro.

Pour mesurer une tension inconnue, inférieure à 1,5 volt, on la substitue à la pile étalon, au moyen d'un commutateur multiple, et on ramène le galvanomètre au zéro en agissant sur le commutateur à 14 bobines et sur le curseur *B*.

Si, comme le montre la figure 186, le commutateur a dû, pour cela, être amené sur le plot 4 et le curseur devant la division 300, c'est que la tension $X = 0,450$ volt.

Lorsqu'on veut mesurer des tensions supérieures à 1,5 volt, on emploie la boîte de résistances auxiliaires qui sert de réducteur de tension.

Cette boîte porte cinq bornes, les deux bornes situées en avant se reliant au potentiomètre. Quant aux trois bornes situées en arrière, on les utilise de la façon suivante :

Si la source de tension inconnue est inférieure à 130 volts, on la branche entre la borne de gauche et celle du milieu.

On emploie, au contraire, les bornes de gauche et de droite, pour les tensions allant jusque 730 volts.

Les mesures d'intensité se font par la méthode du shunt étalonné.

Les divers organes du potentiomètre sont disposés sur une caisse avec dessus en marbre.



FIG. 186. — Schéma des connexions pour la mesure de faibles tensions avec le potentiomètre Crompton.

On trouve successivement à partir de la gauche (fig. 184) :

- 1^o L'interrupteur de la pile auxiliaire ;
- 2^o Le commutateur du rhéostat de réglage ;
- 3^o Un commutateur bipolaire à quatre directions qui sert à brancher sur le circuit de compensation la pile étalon, une source *x* de tension inférieure à 1,5 volt, les bornes d'un shunt étalonné ou les bornes antérieures de la boîte de résistances auxiliaires ;
- 4^o Le commutateur des 14 bobines de 2 ohms ;
- 5^o Un petit rhéostat supplémentaire de réglage, placé en série avec le premier et destiné à en fractionner les variations.

WATTMÈTRES

WATTMÈTRE ÉLECTROSTATIQUE

Wattmètre Blondlot-Curie. — L'électromètre Blondlot et Curie, déjà décrit¹, peut être utilisé comme wattmètre.

Sous l'influence des charges dues aux deux différences de potentiel appliquées U_1 et U_2 , le disque mobile dévie malgré le couple antagoniste produit par les fils de suspension. La déviation est proportionnelle au produit des différences de potentiel U_1 et U_2 , et on a :

$$z = cU_1U_2,$$

c étant une constante et z la déviation.

Il est à remarquer que, si les tensions U_1 , U_2 sont périodiques, les déviations sont indépendantes de la forme des courbes et de la différence de phase de ces tensions. C'est à cause de cette propriété que l'appareil peut servir de wattmètre.

Les bornes du circuit dont on veut mesurer la puissance sont reliées en A et B (fig. 187).

On intercale, d'autre part, dans ce circuit une résistance R non inductive qui est traversée par le courant principal.

Aux bornes de cette résistance R reliée en C et en D se produit une chute de tension qui agit sur les secteurs du disque mobile Ai .

La puissance est simplement mesurée par la déviation.

La différence de potentiel en AB est celle de la source qui alimente le circuit; elle peut donc être considérable. Au contraire, la chute de tension dans la résistance R doit être faible, si l'on veut rendre négligeable la puissance dépensée dans cette résistance.

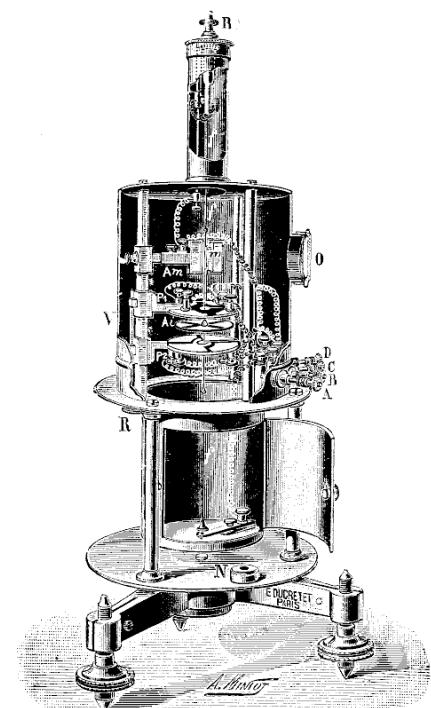


Fig. 187. — Wattmètre électrostatique Blondlot-Curie.

Celle-ci doit cependant avoir une valeur suffisamment grande pour que la déviation soit appréciable.

On peut faire varier la sensibilité de cet instrument en rapprochant ou éloignant du disque

1. Voir, page 36, Electromètre astatique Blondlot et Curie.

mobile i les sections fixes P_1 , P_2 . A cet effet, ces derniers sont supportés par une tige verticale à crémaillère.

Le fil de suspension peut être tendu plus ou moins par la manœuvre du bouton B_0 .

L'amortissement des oscillations est obtenu simplement par l'action d'une palette en aluminium m , fixée au fil de suspension supérieur et mobile dans une boîte fermée dans laquelle la palette se meut avec un jeu réduit au minimum.

Une cage métallique V recouvre tous les organes de l'instrument et les met à l'abri des champs électrostatiques extérieurs.

WATTMÈTRES ÉLECTRODYNAMIQUES

Ce genre de wattmètres est de beaucoup le plus employé; ces instruments dérivent de l'électrodynamomètre.

La bobine mobile est parcourue par un courant proportionnel à la tension du circuit dont on veut mesurer la puissance, tandis que la bobine fixe est traversée par le courant du circuit lui-même.

Les déviations sont proportionnelles au produit des courants, c'est-à-dire à la puissance.

Lorsque les wattmètres doivent servir pour mesurer la puissance de courants alternatifs, il faut que la self-induction de leurs bobines fixe et mobile soit négligeable.

On y arrive en donnant à ces bobines un très petit nombre de spires et en assurant néanmoins une sensibilité suffisante au moyen de dispositions spéciales qui caractérisent chaque instrument.

Il faut aussi que les oscillations de la bobine mobile soient amorties.

Les wattmètres électrodynamiques se divisent en deux catégories :

1^o Ceux dans lesquels la bobine mobile occupe toujours la même position par rapport à la bobine fixe;

2^o Ceux dans lesquels cette position varie.

Dans le premier cas, il faut toucher à l'instrument pendant les mesures, afin d'équilibrer le couple moteur et de ramener la bobine mobile à sa position de repos.

Dans le second cas, cette manipulation est inutile, l'équilibre se produisant automatiquement. Les wattmètres sont alors à *lecture directe* et peuvent être gradués empiriquement.

Wattmètre Carpentier à torsion, modèle portatif. — Cet instrument se compose d'une boîte contenant deux bobines fixes roulées avec du ruban de cuivre de section appropriée et isolé à la soie.

Ces bobines sont couplées en quantité et aboutissent à des blocs placés extérieurement à la boîte et dans lesquels pénètrent les deux fiches, munies de câbles souples, qui servent à intercaler les bobines fixes dans le circuit à essayer.

La bobine mobile, placée dans le champ des bobines fixes, est suspendue par un ressort en boudin qu'on peut tordre de l'extérieur en tournant un bouton moletté.

Ce bouton est solidaire d'un cercle gradué dont les divisions en degrés viennent se présenter devant un repère fixe.

La bobine mobile porte une aiguille qui se déplace entre deux taquets devant un repère également fixe. Ses extrémités aboutissent, l'une à l'entrée des bobines fixes, l'autre à une borne spéciale qui sert à la relier au circuit dont on veut mesurer la puissance, par l'intermédiaire d'une caisse de résistances séparée du wattmètre.

Ces résistances sont bobinées de manière à ne présenter ni self-induction ni capacité; elles ont un coefficient de température négligeable. Elles sont, d'ailleurs, disposées de manière que leur refroidissement soit bien assuré.

La bobine mobile ne comprend que très peu de spires afin de rendre sa self-induction négligeable et ses oscillations sont rendues apériodiques au moyen d'un amortisseur magnétique.

Pour se servir de l'instrument, il suffit de faire tourner le cercle gradué jusqu'à ce que l'aiguille de la bobine mobile revienne devant son repère. On lit alors le nombre de degrés dont il a fallu faire tourner le cercle gradué et on le multiplie par une constante.

Cet instrument permet de mesurer jusqu'à 45 000 watts sous 150 volts ; il a été principalement étudié pour la vérification sur place des compteurs.

La maison Carpentier exposait également un wattmètre à miroir et un wattmètre à lecture directe.

Wattmètre du laboratoire Volta. — Ce wattmètre est construit à peu près comme le voltmètre électrodynamique décrit page 41 et a été étudié par M. Meylan.

La figure 188 représente une vue intérieure et l'aspect extérieur de cet instrument qui se compose de deux bobines fixes roulées avec du ruban de cuivre isolé sur des carcasses indéfor-

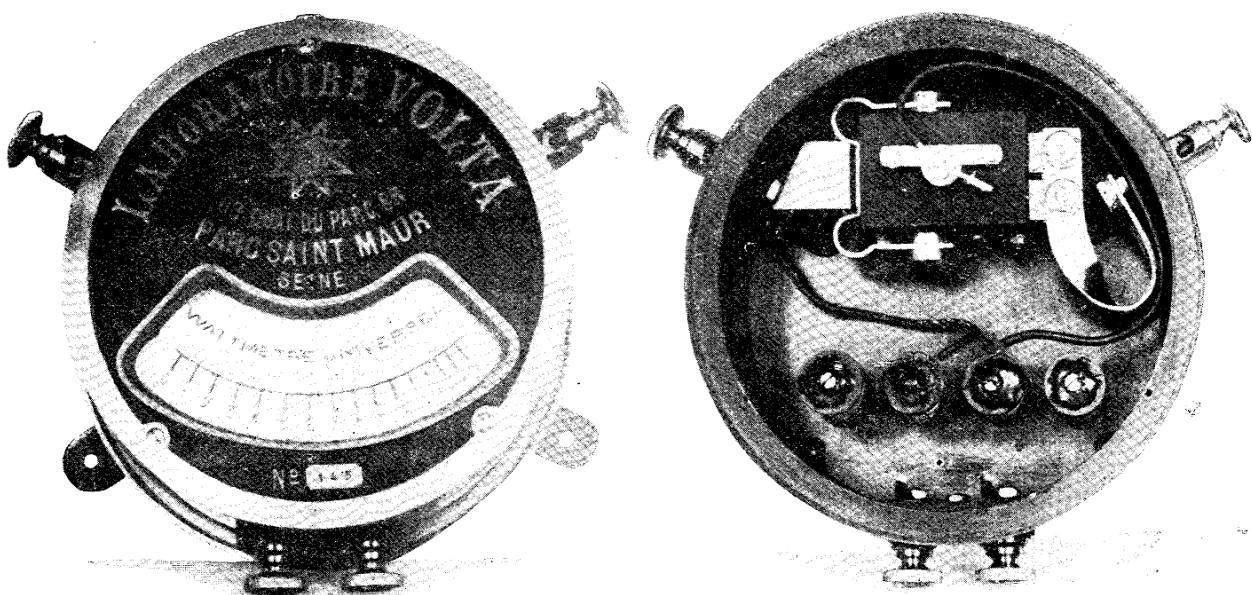


FIG. 188. — Wattmètre du laboratoire Volta.

mables en bois durci. Ces bobines sont couplées en parallèle et aboutissent à des bornes placées à l'extérieur du boîtier métallique.

La bobine mobile est formée de deux petites bobines en fil fin isolé, collées de part et d'autre d'un axe portant l'aiguille indicatrice et monté sur crapaudines en pierres fines.

L'équipage mobile se meut avec un très faible jeu dans une boîte entièrement fermée, de manière à assurer l'amortissement par l'air.

Les résistances qui complètent le circuit dérivé sont au nombre de quatre dans le cas de l'instrument représenté ; elles sont reliées à la bobine mobile, d'une part, et aux deux petites bornes visibles à la partie inférieure du dessin.

Le boîtier métallique est en fonte épaisse et sert à empêcher les champs magnétiques extérieurs d'exercer une action perturbatrice sur les bobines de l'instrument.

La self-induction de la bobine mobile est tellement faible qu'on peut établir l'instrument avec un courant continu, lorsqu'il doit servir pour des courants alternatifs.

Le laboratoire Volta exposait aussi un wattmètre de précision, construit comme le précédent, mais encore plus sensible. Sa bobine mobile pèse seulement 3 grammes et la résistance du circuit dérivé est de 3 140 ohms.

Wattmètre enregistreur J. Richard. — Les wattmètres Richard sont pourvus d'un système enregistreur.

L'instrument (*fig. 189*) se compose de deux bobines fixes horizontales, superposées et formées de ruban de cuivre de section appropriée pour supporter le courant principal.

Ces bobines sont couplées en série ou en quantité ; leurs extrémités aboutissent à des mâchoires permettant de les relier au circuit.

Entre ces bobines est placée une autre bobine en fil fin qui se branche en dérivation sur le circuit par l'intermédiaire d'une résistance appropriée.

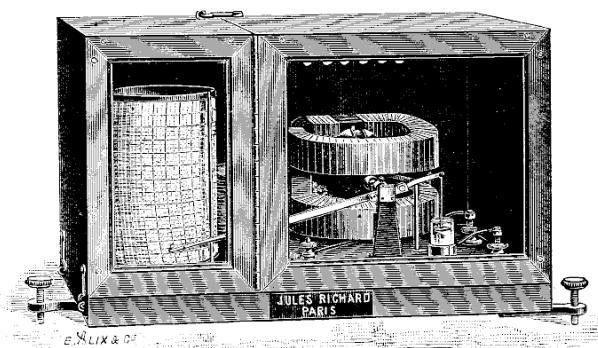


FIG. 189. — Wattmètre J. Richard.

Cette bobine, à axe horizontal, est mobile sur couteaux, l'axe portant en outre le style d'aluminium et la plume.

Sous l'influence des champs que produisent les bobines fixes et mobile, lorsque l'instrument est en service, la bobine mobile tend à s'incliner proportionnellement à la puissance.

Le couple résistant est simplement dû à l'action de la pesanteur sur un contrepoids et l'amortissement des oscillations est obtenu par une petite pompe à glycérine.

Cette pompe peut être remplacée par un amortisseur électromagnétique constitué par un disque d'aluminium de 8 cm de diamètre, calé sur l'axe de la bobine mobile et se déplaçant dans l'étroit entrefer de quatre aimants permanents. En engageant le disque plus ou moins entre les branches de ces aimants, on peut régler l'amortissement à la valeur voulue.

Dans les wattmètres destinés aux courants alternatifs, la résistance additionnelle doit être dépourvue d'induction. Ils doivent cependant être étalonnés pour une fréquence déterminée, à cause de l'importance donnée à la bobine mobile pour obtenir un couple énergique. Lorsque ces instruments sont destinés à des circuits à haute tension, le socle, ordinairement en bois d'acajou, est alors en marbre et les organes susceptibles d'être touchés (tambour, plume, etc.) sont soigneusement isolés.

M. J. Richard construit également un wattmètre enregistreur pour courants triphasés qui ne diffère pas en principe de celui qui vient d'être décrit.

Les bobines fixes B, B' (*fig. 190*), mises en séries sur le circuit, sont au nombre de deux et en ruban de cuivre de section appropriée. Les spires ne se touchent pas et, par conséquent, c'est

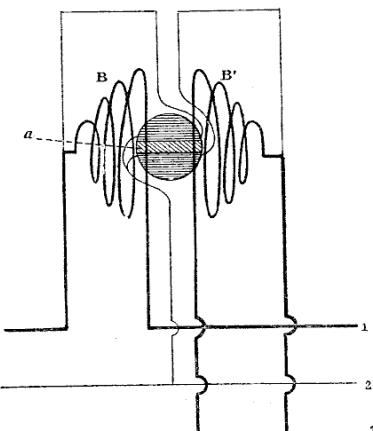


FIG. 190. — Schéma des connexions du wattmètre Richard pour courants triphasés.

l'air qui sert d'isolant. Ces bobines affectent la forme d'une hémisphère, de sorte que l'ensemble qu'elles constituent laisse, au centre, une cavité sphérique dans laquelle se place la bobine mobile α . Sur l'axe de cette dernière, est calé un disque en aluminium dont les bords s'engagent dans les entreferes de quatre aimants disposés radialement. L'axe de la bobine mobile porte également le levier en aluminium à l'extrémité duquel se trouve la plume inscrivante.

La bobine mobile comporte deux enroulements, placés de part et d'autre de son axe horizontal et soumis chacun à l'influence des bobines fixes.

La figure 190 donne le schéma des connexions des bobines fixes et mobile avec les conducteurs d'une distribution triphasée. La bobine fixe B est intercalée dans le conducteur 1 et la bobine B' dans le conducteur 3; quant aux deux enroulements de la bobine mobile, ils ont un point commun relié au conducteur 2, tandis que les extrémités opposées sont reliées respectivement aux entrées des bobines fixes B , B' .

Wattmètre universel Blondel-Labour. — Ce wattmètre (fig. 191) était exposé par M. J. Ducretet, de Paris, qui en est le constructeur.

Le cadre mobile en fil fin est suspendu par un ressort en boudin S se terminant par une tête B qui porte l'aiguille, mobile devant les divisions d'un cadran. Cette disposition est analogue à celle des électrodynamomètres du genre Siemens. Sur le cadre est fixé, en outre, un index i permettant d'apprécier s'il se trouve bien dans la position repérée qu'il doit occuper lorsque l'équilibre des couples, moteur et résistant, est obtenu. Un miroir C permet également cette constatation, mais d'une façon plus précise encore. La figure 192 donne le schéma des connexions.

A sa partie inférieure le cadre se termine par un tambour en aluminium embrassé par les pièces polaires d'un puissant électro-aimant A .

Les bobines fixes H , H' , traversées par le courant principal, sont démontables et à un jeu de bobines on peut en substituer un autre. Ces bobines démontables sont mises en place en quelques instants et fixées contre les colonnes qui amènent le courant. Les connexions se réalisent donc d'elles-mêmes et sans qu'on puisse commettre d'erreurs de groupement. On peut d'ailleurs les coupler en série ou en

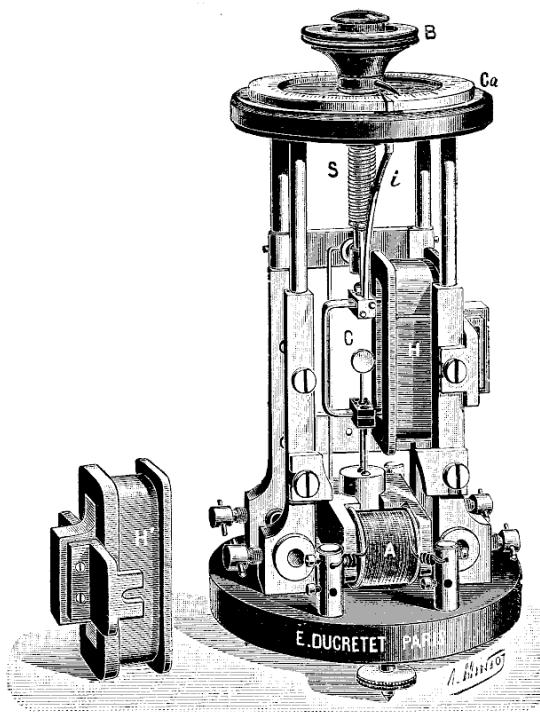


FIG. 191. — Wattmètre Blondel-Labour.

parallèle. Pour les coupler en série (fig. 193), on les monte dans leur position normale en enlevant la barrette bb qui est représentée coupée sur la figure 191. Pour effectuer le couplage en parallèle (fig. 193), on retourne sens dessus dessous une des bobines J' , par exemple, et on met en place la barrette bb .

Les bobines fixes peuvent supporter jusqu'à 2500 ampères et le cadre mobile jusqu'à 100 volts. Lorsque la tension est plus élevée, elle est ramenée en dessous de 100 volts au moyen d'un petit transformateur réducteur ou par l'emploi de résistances auxiliaires.

Les bobines A de l'amortisseur sont excitées par un courant continu provenant de deux

accumulateurs. L'intensité peut être quelconque, puisqu'elle n'intéresse que l'amortissement.

Ce wattmètre a été étudié en vue de réaliser un cadre mobile dont la self-induction soit négligeable. A cet effet le nombre de spires de ce cadre est très faible et, pour obtenir une sensibilité suffisante malgré le petit nombre de spires, le fil du cadre peut supporter un courant de 0,5 ampère.

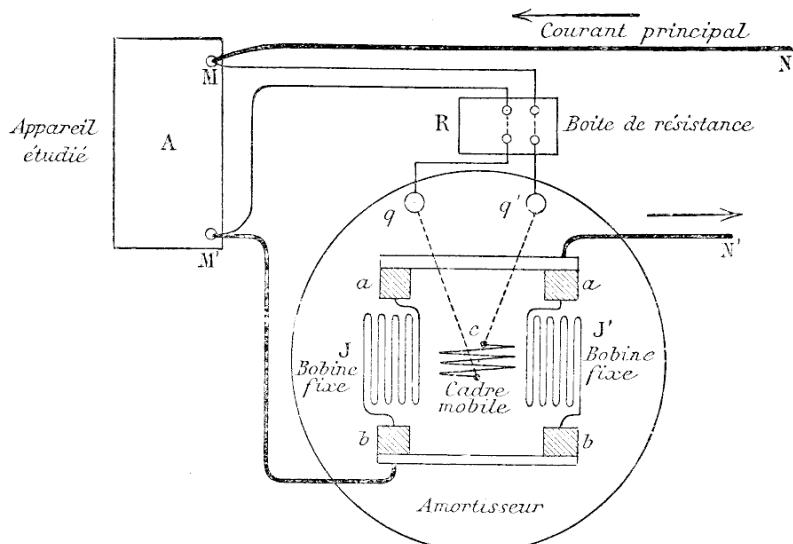


Fig. 192. — Schema des connexions du wattmètre Blondel-Labour.

On peut faire varier la sensibilité en tendant plus ou moins les fils de suspension qui supportent la bobine mobile.

L'extrémité supérieure du fil de suspension s'enroule à cet effet sur un petit treuil logé sous un couvercle en ébonite qui surmonte le bouton B.

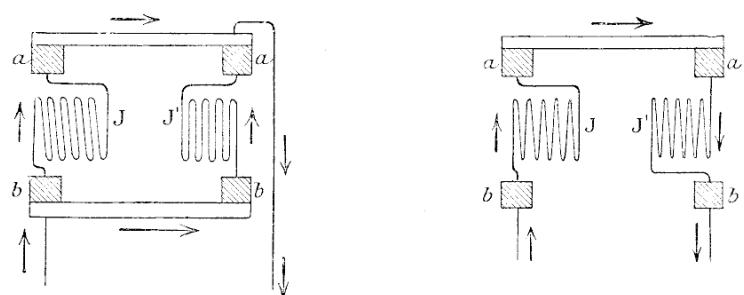


Fig. 193. — Connexions du wattmètre Blondel-Labour avec bobines couplées en parallèle et avec bobines couplées en série.

Il faut remarquer qu'en touchant à ce treuil on fait varier la constante d'étalonnage.

Pour éviter de détériorer la suspension pendant le transport, l'équipage mobile peut être immobilisé en serrant une vis qui vient bloquer le tambour amortisseur contre les pièces polaires de l'électro-aimant A.

Le courant principal est amené aux bobines par les colonnes qui les supportent et dont les parties inférieures sont munies de prises de courant avec vis de pression.

On remarquera que les prises de courant peuvent se faire sur les quatre colonnes et que les deux barrettes b, b qui réunissent les colonnes deux à deux sont amovibles.

Cette disposition permet d'intercaler les bobines H' , H de plusieurs manières dans les circuits et de réaliser les divers modes de montage à employer dans le cas de courants triphasés avec branches inégalement chargées, d'où le nom de *wattmètre universel*.

Wattmètre Hartmann et Braun à lecture directe. — Cet instrument est représenté par la figure 194 qui montre l'aspect du modèle de précision.

Il se compose d'une bobine fixe plate et dont le plan est incliné d'environ 40° sur l'horizontale.

Cette bobine, dont le fil de cuivre a une section appropriée, est traversée par le courant principal et ses extrémités aboutissent, à cet effet, à deux bornes fixées sur le socle de l'instrument.

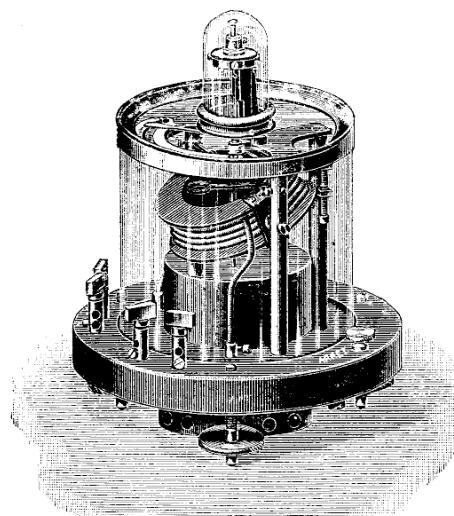


FIG. 194. — Wattmètre Hartmann et Braun.

Le courant dérivé y circule, d'ailleurs, en sens contraire, afin de rendre le système astatique ; ce courant arrive aux bobines par deux rubans d'argent très minces ; il est amené à deux bornes placées sur le socle, de sorte qu'il est possible d'intercaler des résistances extérieures dans le circuit dérivé.

Une des bobines mobiles est attirée par le champ fixe, tandis que l'autre est repoussée ; l'attraction exercée sur l'une des bobines va en augmentant, tandis que la répulsion exercée sur l'autre va en diminuant. La proportionnalité de la graduation est due à cette disposition.

Afin d'éviter les erreurs de parallaxe, une glace étamée est disposée sous l'aiguille.

L'axe se prolonge en dessous du socle et porte une palette d'aluminium mobile dans une grande boîte fermée, visible partie au-dessus, partie au-dessous du socle.

Ce dispositif constitue l'amortisseur à air.

Un bouton d'arrêt placé sur le socle sert à immobiliser l'équipage mobile pendant le transport.

Le fil de suspension peut se remplacer facilement en enlevant la petite cloche en verre qui surmonte la cage de l'instrument ; on accède alors aux crochets de suspension.

La maison Hartmann et Braun exposait également un modèle de wattmètre pour tableau basé sur le même principe.

Le mécanisme est disposé dans un boîtier métallique et l'équipage mobile est monté sur pivots.

La résistance montée en série avec les bobines mobiles est placée dans le boîtier lorsque la puissance à mesurer est fournie sous une tension inférieure à 150 volts.

Quand cette tension est supérieure, on emploie des résistances additionnelles sans induction logées dans une boîte séparée.

Wattmètres de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft. — Cet instrument, dont la figure 195 montre l'aspect extérieur, est analogue au voltmètre électrodynamique déjà décrit¹.

1. Voir page 39.

Les bobines fixes sont simplement enroulées avec du ruban de cuivre isolé et de section convenable. Leurs extrémités aboutissent à des bornes H, H, placées sur des plots en bronze (fig. 196) qui servent à coupler les bobines fixes en série (cheville en 3) ou en parallèle (chevilles en 2 et 4).

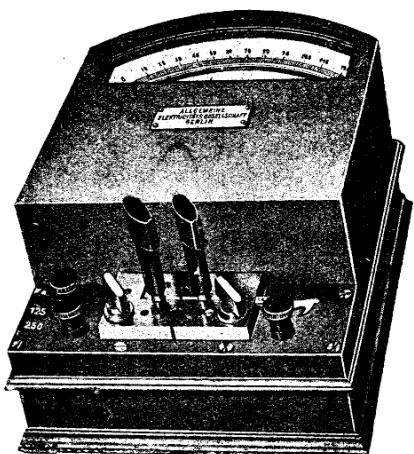


Fig. 195. — Wattmètre de précision de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

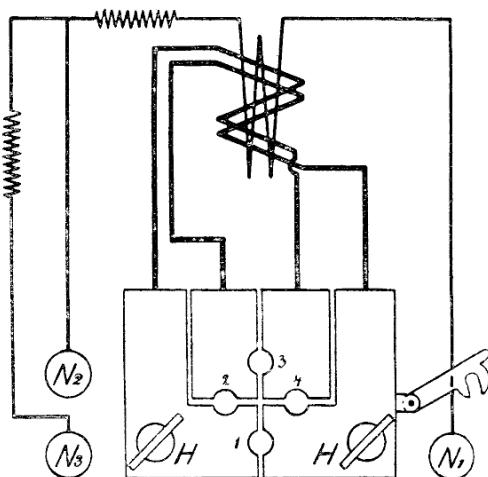


Fig. 196. — Schéma des connexions du wattmètre de précision de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

Le circuit extérieur aboutit aux bornes H, H et une fiche placée en 4 permet de mettre en court-circuit les enroulements en gros fil.



Fig. 197. — Wattmètre pour tableau de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

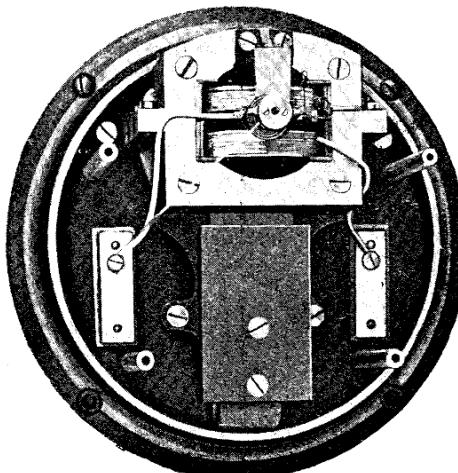


Fig. 198. — Détails de construction du wattmètre pour tableau de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

La bobine mobile est reliée, d'une part, en N₁, à une des bornes du circuit en gros fil au moyen d'une fourchette articulée et, d'autre part, à l'autre conducteur du réseau par l'une des bornes N₂ ou N₃, suivant qu'on veut augmenter ou diminuer la sensibilité par la suppression ou l'adjonction d'une résistance branchée sur N₃.

Grâce à la liaison de la bobine mobile avec la fourchette qui se serre sous la borne N_1 , la différence de potentiel entre la bobine mobile et les bobines fixes est toujours très faible et l'on n'est pas exposé à inverser le sens de groupement de la bobine mobile et des résistances placées en série avec elle.

On sait qu'en commettant cette erreur, la différence de potentiel entre les bobines fixes et mobile pourrait être considérable, puisqu'elle serait alors celle du réseau. L'isolement pourrait être insuffisant et l'instrument détérioré.

On fait usage de la borne marquée N_2 sur la figure 196 pour les tensions inférieures à 125 volts et de la borne N_3 jusqu'à 250 volts ; pour les tensions plus élevées, on emploie une boîte de résistances additionnelles.

La bobine mobile du wattmètre a une résistance de 130 ohms et la résistance additionnelle correspondant à la borne N_3 à 2 000 ohms.

Elle est constituée par du fil dont le coefficient de température est négligeable.

La figure 197 montre l'aspect extérieur et la figure 198 la vue intérieure du wattmètre industriel pour tableaux de distribution. Cet instrument ne diffère pas, en principe, du modèle de précision.

Les bornes de connexion sont disposées par derrière et le boîtier est en fonte, de manière à former écran magnétique et à mettre l'instrument à l'abri des champs extérieurs.

Le wattmètre enregistreur, exposé par la même Société (fig. 199), est de construction identique aux précédents ; il n'en diffère qu'en ce que le couple moteur est rendu plus puissant en augmentant un peu l'intensité du courant dans le circuit dérivé.

Le mécanisme d'horlogerie qui fait tourner le tambour

porte-papier présente cette particularité qu'on peut modifier presque instantanément la vitesse de déroulement. Il suffit, pour cela, de changer les roues dentées fixées l'une au-dessus du barillet du mouvement et l'autre sur l'axe du tambour inférieur.

Afin d'obtenir une longueur de papier assez grande, sans employer un tambour de grand diamètre, le papier forme un rouleau sans fin tendu par deux tambours de petit diamètre.

Le tambour supérieur ne sert que de tendeur ; il n'a pas de relation avec le mouvement d'horlogerie.

Des butoirs, formés de ressorts métalliques, empêchent la plume d'être projetée en dehors du papier.

Les wattmètres pour courants triphasés sont les mêmes que ceux qui viennent d'être décrits. Seul, le mode de connexion avec le circuit extérieur est différent.

Les figures schématiques 200, 201 et 202 indiquent les communications à établir :

1^o Pour un circuit à courant alternatif simple ;

2^o Pour un circuit à courants triphasés avec montage en étoile et point neutre accessible ;

3^o Pour un circuit à courants triphasés avec montage en triangle ou montage en étoile avec

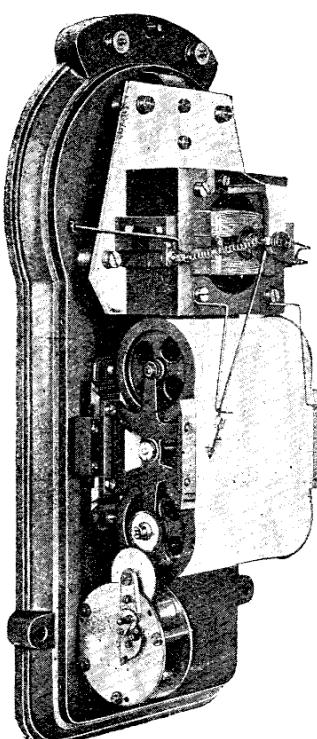


Fig. 199. — Wattmètre enregistreur de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

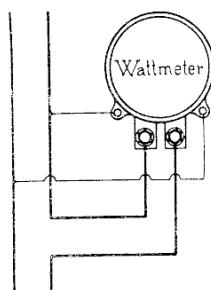


Fig. 200. — Schéma des connexions du wattmètre de l'A. E. G. sur un circuit à courant alternatif simple.

point neutre inaccessible ou n'existant pas. Dans ce dernier cas, il faut créer un point neutre artificiel à l'aide d'une boîte de résistances spéciale comportant quatre bornes. Trois de ces bornes sont reliées respectivement aux trois conducteurs de la canalisation et mettent ces derniers

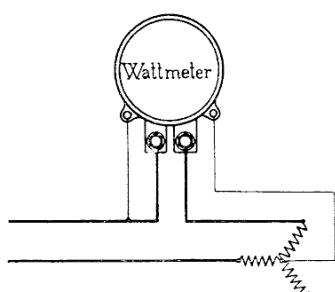


FIG. 201. — Schéma des connexions du wattmètre de l'A. E. G. sur un circuit à courants triphasés monté en étoile.

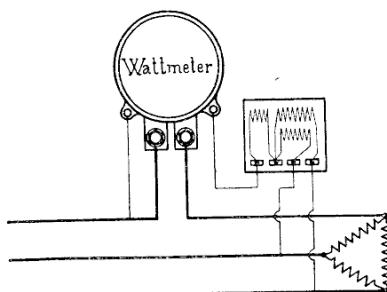


FIG. 202. — Schéma des connexions d'un wattmètre de l'A. E. G. sur un circuit à courants triphasés monté en triangle.

en communication avec des résistances non inductives rigoureusement égales; l'extrémité opposée de chacune de ces trois résistances aboutit à la quatrième borne constituant le point neutre artificiel.

Wattmètre Siemens et Halske. — Le wattmètre Siemens et Halske, que représente la figure 203, est un modèle de précision dont la disposition rappelle beaucoup celle du wattmètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft. Cependant, l'amortissement des oscillations de la bobine mobile n'est plus obtenu par un frein électromagnétique. La Société Siemens a préféré employer un amortisseur à air formé d'un tube cylindrique en laiton, cintré en quart de cercle concentrique à l'axe de la bobine mobile. Cet axe porte une tige horizontale recourbée qui se termine par un piston mobile sans frottement dans le tube cintré. Cette

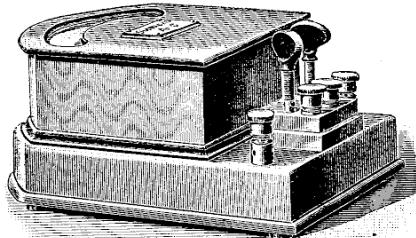


FIG. 203. — Wattmètre de précision Siemens et Halske.

disposition est la même que celle qui a été adoptée pour l'ampèremètre déjà décrit¹.

Cet instrument peut également servir d'électrodynamomètre ordinaire en branchant la bobine mobile en dérivation sur les bornes des bobines fixes. Pour que les indications soient indépendantes de la fréquence des courants, il faut que le rapport des impédances des bobines fixes et mobile soit constant, c'est-à-dire invariable avec la fréquence.

Comme wattmètre industriel pour tableaux de distribution, la Société Siemens exposait un



FIG. 204. — Wattmètre industriel Siemens et Halske.

1. Voir pages 47 et 48.

autre modèle (*fig. 204*), qui ne diffère pas en principe de celui de précision. Les résistances additionnelles sont montées dans une boîte fermée par de la tôle perforée.

Le fil est enroulé sur des plaques de mica aussi minces que le permet leur solidité. La surface embrassée par chaque spire est ainsi excessivement petite et la self-induction se trouve être, par suite, négligeable.

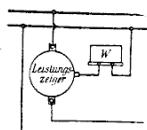


Fig. 205. — Schéma des connexions du wattmètre Siemens et Halske sur un circuit à courant alternatif simple.

Le fil est même presque toujours remplacé par un mince ruban roulé à plat sur les feuilles de mica; ce ruban permet un refroidissement plus facile.

Ces feuilles sont disposées dans une boîte et laissent entre elles un espace de 7 mm à 8 mm qui favorise le refroidissement en même temps qu'il assure un excellent isolement.

La figure 205 montre les connexions à établir pour mettre le wattmètre en service sur une canalisation à courant alternatif simple.

Les wattmètres pour courants triphasés sont identiques au précédent; il n'y a qu'à établir les connexions extérieures comme le montre la figure 206.

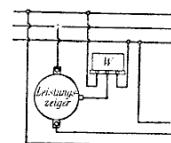


Fig. 206. — Schéma des connexions du wattmètre Siemens et Halske sur un circuit à courants triphasés.

Wattmètre lord Kelvin. — Cet instrument (*fig. 207*), construit et exposé par M. James White, de Glasgow, est destiné à être monté sur les tableaux de distribution et peut servir pour les circuits à haute tension comme pour ceux à basse tension, en modifiant convenablement la résistance du circuit dérivé.

C'est un électrodynamomètre (*fig. 208*) qui présente deux particularités remarquables: le mode de suspension de l'équipage mobile et la combinaison de cet équipage qui le rend à peu près indépendant des actions perturbatrices extérieures.

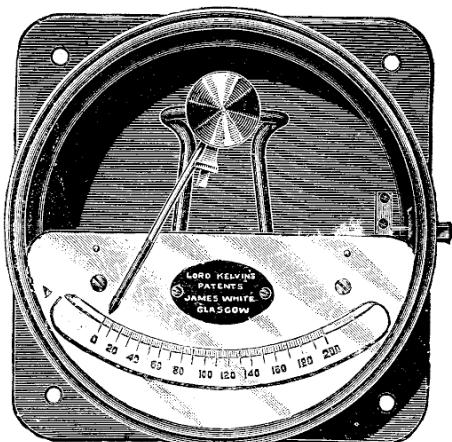


Fig. 207. — Wattmètre lord Kelvin.

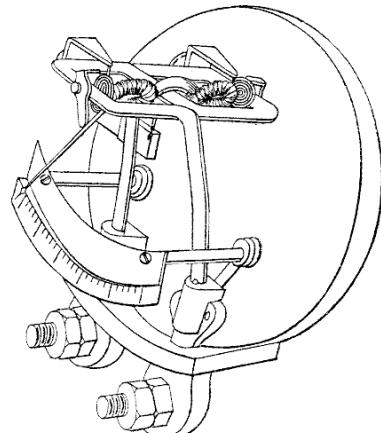


Fig. 208. — Détails de construction du wattmètre lord Kelvin.

La suspension est un dispositif très rudimentaire qui se rapproche de la suspension sur couteaux, avec l'avantage d'admettre des déviations plus grandes tout en facilitant le transport de l'instrument.

L'une des extrémités de l'axe de rotation de l'équipage mobile se termine par un oeillet dont le bord est biseauté; l'autre bout est droit. L'œillet et le pivot sont simplement suspendus à deux cochets (*fig. 209*).

L'indifférence aux actions extérieures est obtenue en rendant l'équipage astatique par rapport aux champs autres que celui que produisent les bobines fixes. L'équipage mobile comporte donc deux bobines, reliées entre elles par un bras léger en aluminium et enroulées en sens inverse.

Il faut un double système fixe qui agisse en sens inverse sur ces deux bobines, de manière que les couples s'ajoutent. Dans les instruments de grande puissance, ce système est constitué par un conducteur unique en cuivre, affectant la forme d'un 8 ou d'un S, et formant ainsi deux bobines à spire unique agissant dans le sens voulu sur celles de l'équipage mobile.

Le couple directeur est produit par deux petits ressorts en palladium qui servent, en même temps, de conducteurs au courant.

Chaque bobine mobile comporte 1 000 tours et la résistance totale des deux bobines est de 200 ohms. L'intensité maximum du courant qui les parcourt n'est que de 0,05 ampère.

La résistance supplémentaire, non inductive, est de 2 000 ohms pour 100 volts; elle est enroulée en dessous de la boîte contenant l'instrument, de manière à offrir une grande surface de refroidissement.

L'instrument est monté sur un socle en ardoise sur lequel sont fixées les bobines fixes et les supports de l'échelle divisée.

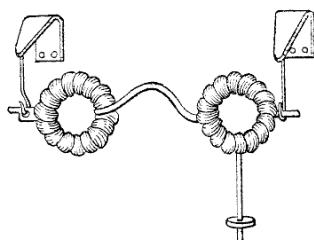


Fig. 209. — Détails de construction du wattmètre lord Kelvin.

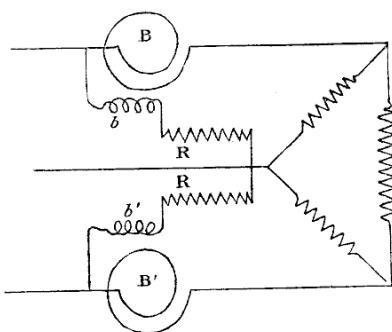


Fig. 210. — Schéma des connexions du wattmètre lord Kelvin sur un circuit à courants triphasés.

Un autre modèle de wattmètre est établi pour les circuits à courants triphasés. On établit alors les connexions comme l'indique la figure 210 pour le cas d'un circuit triphasé monté en triangle. Les bobines fixes B B' sont intercalées respectivement en série dans les conducteurs 1 et 3 de la canalisation. Les bobines mobiles b b' sont reliées en dérivation, d'une part aux bobines fixes et, d'autre part, au conducteur 2, après avoir traversé chacune une résistance RR non inductive. Ces deux résistances doivent être rigoureusement égales.

La graduation de ce wattmètre est établie de manière à faire connaître, par une simple lecture, la puissance totale du système triphasé. Les indications sont exactes même si les trois phases sont inégalement chargées.

Au point de vue de l'isolement, chaque instrument est essayé par le constructeur sous une tension double de la tension maximum de fonctionnement. Les wattmètres pour tensions au-dessous de 250 volts ont leurs résistances additionnelles placées à l'intérieur du boîtier; au-dessus de 250 volts, on les loge dans une boîte indépendante.

Il se construit quatre modèles de ce wattmètre pour une intensité de 200 ampères et des tensions respectives de 200, 300, 1 000 et 2 500 volts.

Les bornes sont placées sur la partie postérieure et un bouton sert à immobiliser l'équipage mobile lorsqu'on transporte l'instrument.

Wattmètres Ganz. — Dans les wattmètres de la maison Ganz et C^{ie}, de Budapest, le cadre mobile est enroulé avec du fil d'aluminium afin de réduire la masse en mouvement. Celle-ci est de 23 grammes et ses pivots tournent dans des crapaudines en saphir. Deux bandes très minces, en argent, servent à amener le courant au cadre.

Les indications de torsion du ressort doivent être multipliées par la résistance du circuit

et par la constante de l'instrument. Les indications sont indépendantes de la fréquence des courants, grâce à la faible self-induction des bobines.

Les résistances additionnelles qu'on intercale dans le circuit du cadre mobile, suivant la tension du courant à mesurer, sont renfermées dans une boîte et sont divisées en fractions de 250 ohms, sauf la première, qui n'a que 237 ohms et qui constitue 250 ohms avec le cadre mobile qui a une résistance de 13 ohms.

Ces résistances sont en fil de manganin et leur résistance est ajustée au millième; elles n'ont pas de self-induction.

Le cadre et les résistances additionnelles peuvent supporter indéfiniment un courant de 0,1 ampère et, pendant quelques instants, 0,13 ampère. Tous les wattmètres de cette maison ayant un cadre mobile de 13 ohms; les résistances additionnelles sont interchangeables.

Ces wattmètres ne sont pas à lecture directe; la Société Ganz en exposait quatre modèles ne différant que par la puissance qu'ils peuvent mesurer. L'un était construit de manière à pouvoir mesurer une puissance très faible et est destiné à déterminer les pertes à vide des transformateurs.

Un wattmètre de construction ancienne (1887) figurait à côté des modèles récents, afin de mieux faire saisir les progrès réalisés depuis cette époque dans la construction de ce genre d'instruments.

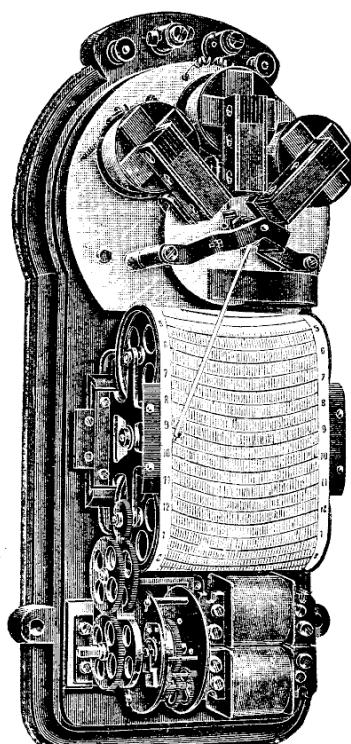


Fig. 211. — Wattmètre d'induction avec enregistreur de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

es branches embrassent le bord du disque mobile.

La graduation dépend de la fréquence.

Ce modèle de wattmètre se construit avec enregistreur (fig. 211) ou sans enregistreur.

Lorsque ces instruments sont placés sur un circuit à haute tension, on ne les monte pas directement sur ce circuit; comme les indications qu'ils fournissent sont indépendantes de la forme des courbes de courant, on alimente les bobines des électro-aimants par l'intermédiaire de transformateurs réducteurs de tension.

Wattmètre Ferraris. — Cet instrument (fig. 212), construit et exposé par la Société Siemens et Halske, de Berlin, est basé sur le même principe que les ampèremètres et voltmètres du même inventeur¹.

1. Voir page 61.

2. Voir page 64.

WATTMÈTRES D'INDUCTION

Wattmètres de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft. — Les wattmètres exposés par cette Société sont basés sur le même principe que les ampèremètres et les voltmètres d'induction décrits précédemment¹.

Les électro-aimants, munis d'écrans, sont au nombre de trois et agissent sur le même disque mobile (fig. 211).

L'électro-aimant placé au milieu ne comporte pas d'écran et est excité par le courant principal; les deux autres, garnis d'écrans en cuivre rouge, ont leur bobine mise en dérivation sur le circuit.

L'amortissement est obtenu par un aimant dont

Les bobines montées en série sur le circuit principal sont disposées sur les deux pôles diamétraux f , f (fig. 213), tandis que les bobines montées en dérivation sont celles marquées e , e sur la figure. L'équipage mobile, constitué par un tambour b en aluminium, se comporte comme une cage d'écureuil de moteur à champ tournant.

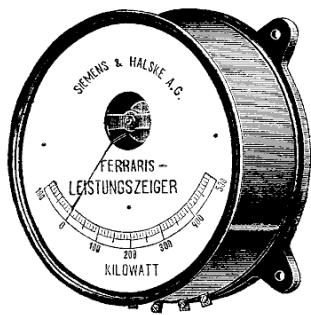


FIG. 212. — Wattmètre d'induction Ferraris.

Lorsque les courants qui doivent passer dans les bobines f , f ont une intensité supérieure à 300 ampères, on utilise un transformateur. De même, si la tension que doivent supporter les bobines e , e est supérieure à 550 volts, on place en série avec elles une bobine de réactance ; ce n'est qu'avec les courants de haute tension que l'on fait usage d'un transformateur, ce qui présente l'avantage de mettre l'instrument en dehors du circuit dangereux.

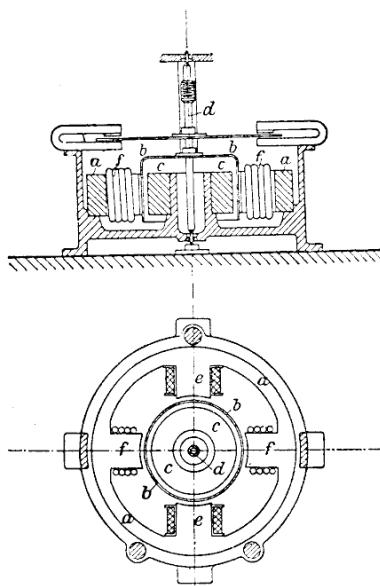


FIG. 213. — Détails de construction du wattmètre d'induction Ferraris.

INSTRUMENTS DE MESURE SPÉCIAUX POUR LES COURANTS ALTERNATIFS

Indépendamment des instruments de mesure, tels que voltmètres, ampèremètres, etc., utilisés sur les circuits à courants alternatifs, il y a certains instruments spéciaux dont l'usage tend à se répandre de plus en plus. Ce sont les phasemètres, les fréquencemètres, les oscillographes et les rhéographies.

PHASEMÈTRES

Les phasemètres ont pour objet de faire connaître, par une simple lecture, la valeur du facteur de puissance d'un réseau alimenté par des courants alternatifs. Les phasemètres pourraient remplacer les trois instruments : ampèremètre, voltmètre et wattmètre, qui permettent, par trois lectures simultanées, une sur chacun de ces instruments, de déterminer le facteur de puissance par la méthode habituelle.

En pratique, les phasemètres ne sont utilisables qu'à la condition que les courbes de tension et d'intensité soient des sinusoïdes, condition difficile à réaliser, car les harmoniques de fréquences supérieures à la fondamentale viennent compliquer la forme des courbes de tension, et principalement celles d'intensité.

Les phasemètres ne sont guère employés qu'en Allemagne et ceux qui figuraient à l'Exposition étaient presque exclusivement de construction allemande.

Phasemètre Siemens et Halske. — Cet instrument qui affecte extérieurement l'aspect d'un wattmètre de tableau de distribution ne laisse voir qu'un boîtier muni de quatre bornes et une graduation devant laquelle se meut une aiguille indicatrice.

La figure 214 montre comment est constitué l'instrument qui a été combiné par von Dolivo Dobrowolski.

Un disque mince de tôle de fer est monté sur un axe qui porte l'aiguille *c*; cet axe tourne dans des crapaudines en saphir.

Un ressort spiral *r*, en bronze, tend à maintenir ce disque au zéro de la graduation.

Sur ce disque agissent deux enroulements : l'un *A*, en ruban de cuivre de section appropriée, est parcouru par le courant principal ; l'autre, formé de deux bobines *a*, *b*, enroulées en fil fin, est disposé perpendiculairement au plan de la bobine *A*. Ces bobines *a*, *b*, reliées en série, sont montées en dérivation sur le circuit, par l'intermédiaire d'une résistance additionnelle non inductive. L'instrument comprend donc les enroulements d'un wattmètre.

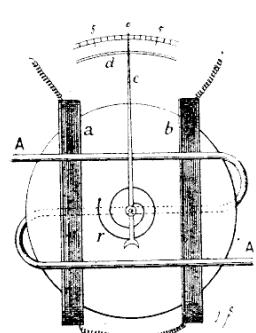


Fig. 214. — Phasemètre Dolivo Dobrowolski.

Le courant dans le circuit dérivé est toujours en phase avec la tension du réseau, cet enroulement ayant une self-induction négligeable.

Au contraire, dans la bobine A, le courant a le même décalage que celui qui existe dans le réseau.

Il se produit donc un champ tournant qui agit sur le disque mobile et exerce sur lui un couple :

$$C = KI \sin \varphi.$$

K est la constante de l'instrument et $I \sinus \varphi$ est la composante déwattée du courant principal.

L'instrument étant gradué empiriquement se comporte comme un ampèremètre qui n'indiquerait que le courant déwatté.

D'ailleurs, le zéro étant au milieu de la graduation, il est facile de voir le signe de $I \sinus \varphi$ d'après le sens de la déviation.

Si la déviation se produit vers la droite, le courant est en retard sur la tension et le courant déwatté provient de la self-induction des appareils branchés sur le réseau, appareils qui absorbent des courants magnétisants.

Si la déviation est à gauche, le courant avance sur la tension et il est dû à des phénomènes de capacité ou à la présence de moteurs synchrones convenablement surexcités.

Phasemètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft. — Cet instrument, que représente la figure 215, est constitué comme le wattmètre d'induction qui a été décrit précédemment¹.

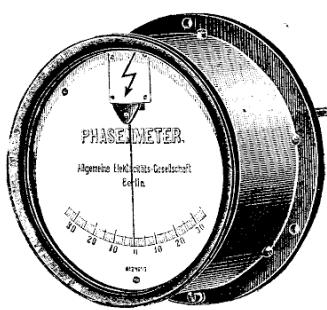


FIG. 215. — Phasemètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

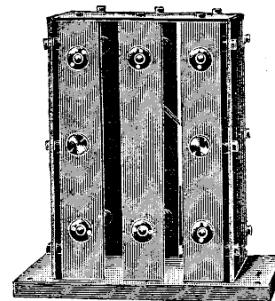


FIG. 216. — Résistance pour phasemètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

Le disque mobile, monté sur pointes et portant l'aiguille, est influencé par trois systèmes d'électro-aimants.

Celui du milieu est excité par le courant principal et ne comporte pas d'écrans à ses pôles.

Les deux autres électro-aimants, placés de part et d'autre du premier, ont leurs pôles munis d'écrans formant un circuit en dérivation sur le réseau.

Contrairement à ce qui se passe pour le wattmètre, où le courant dérivé doit être décalé d'un quart de période par rapport à sa tension, le courant, dans le cas actuel, doit être en phase avec cette tension. A cet effet, la bobine de self-induction qui, dans le wattmètre, remplace la résistance non inductive ordinaire, est ici supprimée. On lui substitue une résistance sans induction dont la figure 216 montre l'aspect.

Cette résistance, pour 3 000 volts, est fractionnée et enroulée dans la gorge de poulies en porcelaine. Celles-ci sont maintenues entre des plaques de stabilite et forment trois rangées verticales.

L'isolement et le refroidissement sont ainsi assurés. L'instrument est gradué empiriquement en ampères ($I \sinus \varphi$) et fait connaître le courant déwatté avec son signe, le zéro étant au milieu.

1. Voir page 124.

Cet instrument a l'avantage de donner des indications indépendantes de la forme des courbes de courant, mais sa graduation n'est valable que pour une fréquence peu différente de celle du courant qui a servi à l'étalonner.

Les oscillations sont amorties par un aimant entre les pôles duquel s'engage le disque mobile.

La même Société exposait un instrument du même genre pour courants triphasés.

Dans ce phasemètre, il y a un électro-aimant monté en série dans le circuit et deux électro-aimants mis en dérivation : le premier se branche sur le conducteur 1 de la distribution, tandis que les électro-aimants en dérivation se branchent entre les fils 1, 2 et 3, par l'intermédiaire d'une triple résistance destinée à créer un point neutre artificiel.

Ce montage est, d'ailleurs, identique à celui que représente la figure 202 donnant les connexions à établir pour un wattmètre placé dans un circuit à courants triphasés.

Phasemètre Hartmann et Braun. — Cet instrument, étudié par M. Bruger, se compose de deux bobines fixes N_1 , N_2 , montées en série et intercalées sur un des conducteurs du réseau, comme la bobine à gros fil d'un wattmètre (fig. 217).

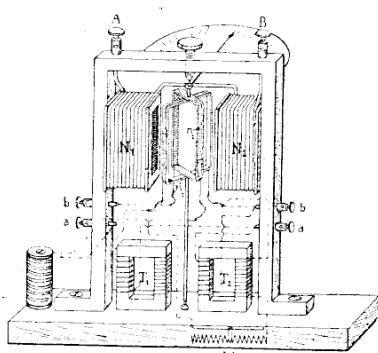


FIG. 217. — Phasemètre Hartmann et Braun.

Dans les champs de ces bobines peut se mouvoir une double bobine à fil fin, formée de deux cadres indépendants n_1 , n_2 , disposés perpendiculairement.

Un de ces cadres est monté en dérivation sur les deux conducteurs de la canalisation à travers une bobine de résistance non inductive, visible sur la gauche du dessin.

L'autre cadre est également dérivé sur le réseau, mais à travers une bobine de self-induction composée de deux petits transformateurs T_1 , T_2 .

Le transformateur T_2 a son secondaire fermé sur une résistance variable W non inductive.

Grâce à ces dispositions, les courants dans les deux cadres mobiles sont décalés d'un quart de période.

Si le courant qui traverse les bobines fixes ne présente pas de décalage, le système de bobines mobiles doit se maintenir au zéro, tandis qu'il reste en équilibre indifférent s'il n'y a pas de courant qui y passe.

Si le courant dans les bobines fixes est plus ou moins déwatté, le système de bobines mobiles prendra une orientation définie et l'aiguille indique directement la valeur de l'angle φ de décalage.

On règle l'instrument en s'assurant qu'il n'y a pas de déviation lorsqu'un courant n'ayant pas de décalage traverse les bobines fixes N_1 , N_2 (courant fourni par un alternateur qui débite sur des lampes à incandescence). S'il se produit une déviation, on agit sur la résistance W jusqu'à ce que la déviation soit nulle ; l'appareil est alors réglé.

Les indications de cet instrument dépendent de la fréquence, à cause de la présence du fer dans les transformateurs T_1 , T_2 .

On remarquera que l'équipage mobile et la disposition de cet instrument sont semblables à ceux de l'ohmmètre à lecture directe de la même maison.

Le courant arrive aux cadres par des fils extrêmement souples qui ne doivent pas introduire de couple de torsion.

Phasemètre des tangentes de Riccardo Arno. — Dans cet instrument, représenté schématiquement par la figure 218, on obtient la valeur de la tangente de l'angle de décalage au moyen de deux lectures successives effectuées sur les deux cadrans distincts que porte l'instrument.

Ce phasemètre se compose d'une bobine fixe A_1 et d'une bobine mobile A_2 suspendue par des ressorts en boudin m, m' .

Les courants I, I' , dont on veut mesurer la différence de phase, traversent chacun une des deux bobines A_1, A_2 . A cet effet, on se sert respectivement des bornes 1, 2 et 3, 4.

Cette partie de l'instrument ne diffère pas, comme construction, d'un électrodynamomètre ordinaire.

L'index I de la bobine mobile peut toujours être ramené devant un repère en tordant le ressort m . On apprécie cette torsion sur le cadran D , à l'aide de l'aiguille I' .

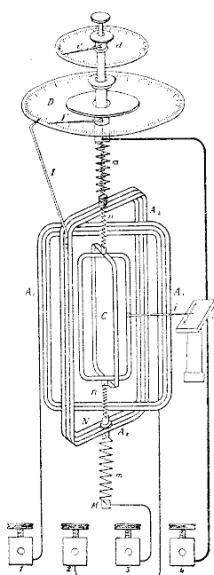


FIG. 218. — Phasemètre des tangentes
Riccardo Arno.

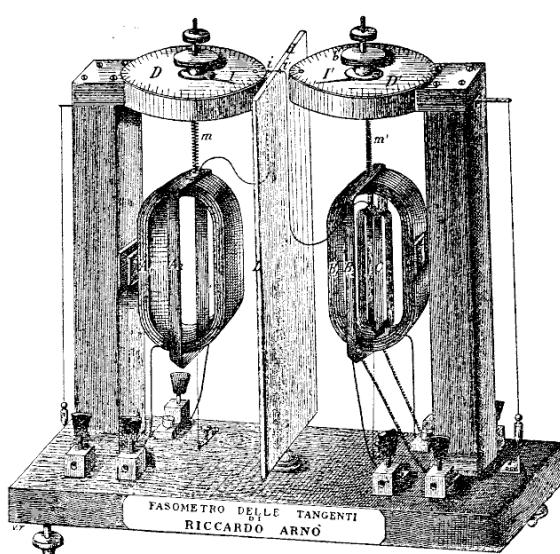


FIG. 219. — Autre modèle de phasemètre des tangentes
Riccardo Arno.

Entre les bobines A_1, A_2 se trouve un double cadre C , formé de deux rectangles en cuivre fixés perpendiculairement l'un à l'autre. Ces deux cadres, qu'on peut remplacer par un tambour d'aluminium, constituent un induit de moteur à champ tournant fermé sur lui-même. Ces cadres sont suspendus par des ressorts n, n et l'index i , que porte l'un des cadres, peut être amené devant un repère en tordant les ressorts n, n . On apprécie cette torsion par la position de l'index i' sur le disque divisé d .

Pour faire une mesure, on tourne l'index I' jusqu'à ce que les deux bobines A_1, A_2 restent perpendiculaires ; soit α la torsion donnée aux ressorts m pour équilibrer le couple dû au courant.

On déplace alors l'index i' jusqu'à ce que l'index i vienne au zéro ; soit α' la déviation sur le cadran d .

On a :

$$\tan \varphi = K \frac{\alpha'}{\alpha},$$

K étant la constante de l'instrument.

En réalité, pendant la détermination de α , les cadres C ne doivent pas être fermés sur eux-mêmes.

Un dispositif, non figuré sur le dessin, permet d'ouvrir ou de fermer à volonté le circuit des deux cadres.

Ceux-ci ne sont fermés sur eux-mêmes que pendant la mesure de α' .

Cet appareil présente l'inconvénient de nécessiter que les courants I, I' restent constants pendant toute la durée de l'essai.

Le professeur R. Arno exposait un autre instrument n'offrant pas cet inconvénient et permettant d'opérer en une seule fois. Cet instrument (*fig. 219*) se compose d'un électrodynamomètre ordinaire dont les bobines A_1 fixe et A_2 mobile sont parcourues par les courants I, I' , dont on veut connaître la différence de phase. Ces courants parcourent en outre respectivement les bobines fixes B_1, B_2 , visibles à droite; entre ces bobines se trouve le cadre C formé de deux bobines perpendiculaires fermées sur elles-mêmes.

Un écran L en cuivre rouge pur (exempt de fer) sépare les deux systèmes de bobines de gauche et de droite et évite qu'ils ne s'influencent réciproquement.

Pendant le passage des courants I, I' , on tourne simultanément les deux boutons de torsion et on amène en même temps les index des deux systèmes devant leur repère. Comme précédemment, les index I, I' mobiles devant les divisions des cadrans D, D' font connaître les angles z, z' qui permettent de calculer la tangente de l'angle φ .

FRÉQUENCEMÈTRES

Les fréquencemètres sont, comme leur nom l'indique, des instruments qui servent à déterminer la fréquence d'un courant alternatif.

Comme ces instruments sont peu nombreux et que leur usage est, d'ailleurs, assez restreint, nous ne ferons que les décrire sommairement.

Fréquencemètre à diapason Stockardt. — Cet instrument, construit par la maison Stiebelitz, de Dresde (Allemagne), se compose d'un diapason dont les branches sont larges et minces. Des masses peuvent être déplacées le long des branches en tournant un bouton moletté qui, par l'intermédiaire d'un fil, tire en même temps sur les deux masses.

Ce dernier point est important, les deux branches devant rester d'accord. La période de vibration diminue quand les masses se rapprochent des extrémités libres des branches. Ce diapason est entretenu électriquement par l'intermédiaire d'un électro-aimant traversé par le courant dont on veut déterminer la fréquence. Il entre en vibration quand sa période correspond à celle du courant.

Celle-ci se lit sur une graduation tracée empiriquement et qui s'étend de 40 à 50 périodes par seconde.

L'instrument est disposé comme un voltmètre et, comme lui, se place en dérivation sur le circuit. Il supporte 100 volts sans résistances additionnelles.

Fréquencemètre R. Kempf. — Le fréquencemètre de R. Kempf, construit et exposé par MM. Hartmann et Braun, est basé sur les phénomènes de résonance.

Cet instrument (*fig. 220*) comporte une série de 32 lames vibrantes en acier, montées comme des anches de musique et disposées contre la paroi intérieure d'une boîte cylindrique. Ces anches sont réglées par demi-période de 40 à 50 périodes par seconde. Un électro-aimant droit, porté par un axe pivotant au centre de la boîte, peut être amené successivement en regard de chacune de ces anches. Cet électro-aimant en fil fin se place, comme un voltmètre, en dérivation sur le circuit; lorsqu'il est parcouru par un courant alternatif et qu'il passe devant une anche accordée pour la même période que ce courant, cette anche vibre et rend un son d'autant plus intense que la résonance est plus parfaite.

Pour se servir de cet instrument, il suffit simplement de faire tourner l'électro-aimant jusqu'à ce qu'il soit amené devant l'anche convenable; à ce moment, un index, porté par l'axe, indique sur un cadran la fréquence correspondante. Si la fréquence est comprise entre les valeurs de deux anches consécutives, elles vibrent toutes deux en même temps, indiquant ainsi une valeur intermédiaire entre les deux indications.

Fréquencemètre Hartmann et Braun. — Un autre modèle de fréquencemètre, exposé par les mêmes constructeurs (fig. 221), est plutôt un indicateur qu'un instrument de mesure. Il ne comporte que deux lames vibrantes : l'une vibrant lorsque la fréquence est supérieure à la normale, l'autre lorsque cette fréquence est inférieure. Deux électro-aimants actionnent ces lames.

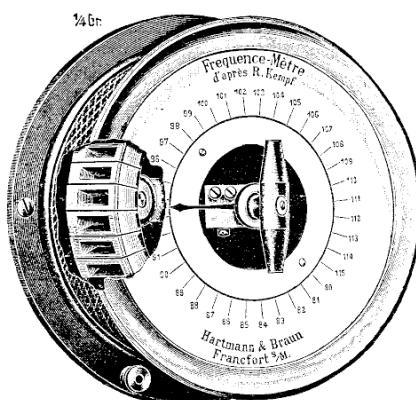


FIG. 220. — Fréquencemètre R. Kempf.

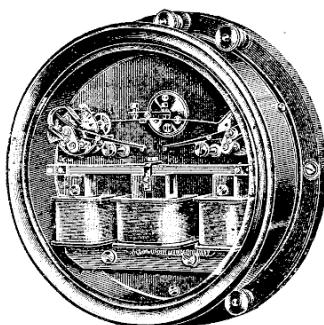


FIG. 221. — Fréquencemètre Hartmann et Braun.

Lorsque la vitesse angulaire de la dynamo génératrice est normale, les lames ne vibrent point ; mais, si la vitesse angulaire augmente ou diminue, l'une des deux lames entre en vibration et l'amplitude du son est d'autant plus grande que l'on se rapproche le plus de la résonance.

Fréquencemètre R. Arno. — Le dispositif imaginé par le professeur Riccardo Arno ne constitue pas un instrument spécial ; il se compose d'un électromètre, d'un condensateur C de 1 microfarad et d'une boîte de résistances. Ces instruments sont reliés entre eux, comme l'indique le schéma donné par la figure 222.

Le condensateur est monté en série avec la résistance variable R qui doit être non inductive et les deux instruments sont placés en dérivation sur les deux conducteurs A, B du réseau.

L'électromètre est d'abord branché sur le réseau en mettant la manette du commutateur O sur le plot a et on mesure la différence de potentiel U entre A et B. On place ensuite la manette en b pour mesurer la différence de potentiel aux bornes de la résistance R que l'on fait varier jusqu'à ce que la tension mesurée U' soit égale à $\frac{U}{2}$.

On a ainsi tous les éléments nécessaires pour calculer la fréquence et il n'y a qu'à appliquer la relation suivante pour calculer ω :

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} = \frac{U}{R} = \frac{U}{2R},$$

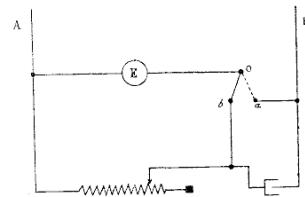


FIG. 222. — Fréquencemètre R. Arno.

le courant ayant la même intensité dans la résistance R et dans le condensateur.

Dans l'expression ci-dessus, $\omega = 2\pi$ fois la fréquence.

OSCILLOGRAPHES ET RHÉOGRAPHES

Les instruments servant à l'étude des courbes des courants alternatifs se divisent en deux classes :

1^o Instruments traçant les courbes d'une manière ininterrompue, comprenant les oscillographes et les rhéographes, dans lesquels les courbes sont observées à l'aide de la méthode stroboscopique ;

2^o Instruments permettant le tracé des courbes par points et basés sur la méthode du contact instantané imaginée par M. Joubert.

En principe, les oscillographes se composent d'un galvanomètre dont la période d'oscillation propre est excessivement courte et d'un analyseur comprenant un moteur synchrone. Dans les rhéographes, au contraire, les oscillations du galvanomètre sont très lentes, comparées à la période du courant étudié.

Oscillograph Duddell. — Cet instrument (fig. 223), construit et exposé par la Cambridge Scientific Instrument Co, de Cambridge (Grande-Bretagne), se compose de deux parties essentielles : le galvanomètre ou oscillograph proprement dit et le moteur synchrone.

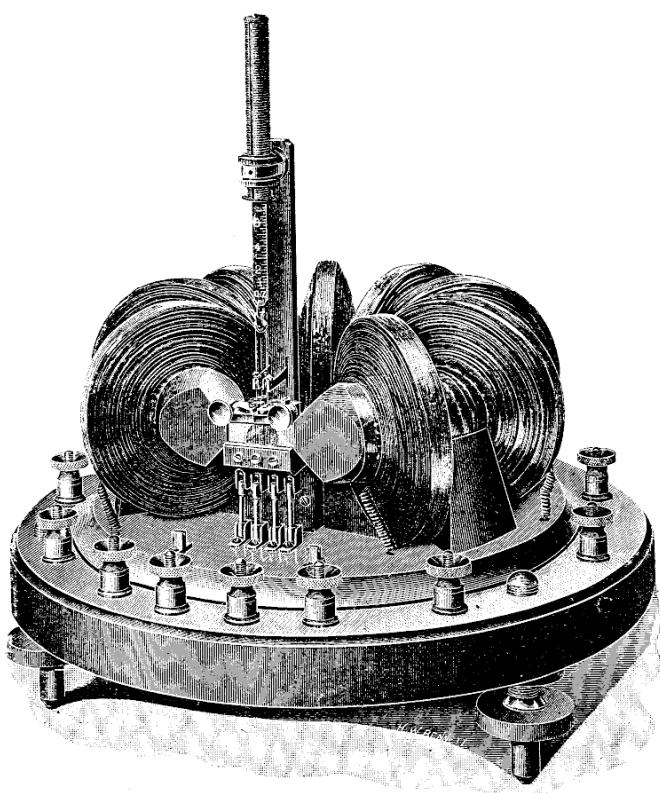


Fig. 223. — Oscillograph Duddell.

Le galvanomètre est disposé de manière à donner une déviation constamment proportionnelle à la valeur instantanée de l'intensité du courant à étudier.

Le moteur synchrone porte un miroir analyseur qui sépare les déviations successives de l'oscillographie et permet de les observer en les étalant sur une courbe qui est précisément celle du courant. Le galvanomètre Duddell est basé sur le principe du galvanomètre Deprez-d'Arsonval.

Il se compose d'un anneau de fer doux, disposé horizontalement sur un socle muni de vis calantes. En un point, l'anneau est coupé de manière à laisser subsister un entrefer dans lequel se meut le cadre du galvanomètre.

L'anneau de fer est recouvert de huit bobines magnétisantes, excitées par le courant de quelques accumulateurs, et remplace l'aimant ordinaire.

Les dimensions de l'anneau sont telles que cet électro-aimant est très saturé. De cette façon, le champ magnétique est pratiquement invariable, même si le courant d'excitation n'est pas tout à fait constant.

Suivant le courant dont on dispose, on couple en série ou en quantité les diverses bobines magnétisantes, en reliant convenablement leurs bornes.

Le cadre galvanométrique (fig. 224) se compose d'une bande très mince et très étroite en bronze phosphoreux qui, après s'être repliée en passant sur une poulie P, vient s'attacher par ses deux extrémités aux bornes s , s' , situées à la partie inférieure de l'anneau de fer.

La poulie, tirée vers le haut par un ressort dynamométrique, exerce une tension égale sur les deux côtés s , s' , du cadre. Comme on peut le voir à la partie supérieure de la figure 223, un système de vis et d'écrous permet de faire varier la tension exercée sur la poulie P et, par suite, de modifier la durée d'oscillation propre du cadre mobile.

Des chevalets K, L limitent la partie du cadre susceptible de vibrer quand on lance un courant périodique dans l'oscillographie.

Le miroir M est très léger ; il est collé sur les deux branches de la bande de bronze et sert à apprécier l'amplitude des déviations.

Quand la bande est convenablement tendue, la période d'oscillation du cadre est d'environ 0,0001 seconde ; elle est donc insignifiante eu égard à la fréquence des courants alternatifs industriels.

Le cadre, réduit ainsi à une spire, a une résistance négligeable ; sa self-induction est également négligeable et la sensibilité largement suffisante à cause de la valeur élevée du champ magnétique de l'électro-aimant.

Le galvanomètre que représente la figure 223 comprend en réalité deux cadres indépendants, placés à côté l'un de l'autre et portant chacun leur miroir.

Il est possible, dans ce cas, de relever simultanément des courbes de tension et d'intensité de courants.

Un miroir fixe, placé entre les deux premiers, donne la ligne de déviation nulle, ligne prise pour axe des x .

Une petite cage vitrée protège l'ensemble du système mobile et contient le liquide qui sert à en amortir les oscillations. Ce liquide est ordinairement de l'huile de vaseline. Le moteur synchrone (fig. 225) ne présente rien de bien spécial.

Il se compose de deux électro-aimants en fer à cheval, placés en regard, et dont les noyaux, en tôles isolées, sont recouverts de bobines excitées par le courant à étudier.

Entre les pôles de ces électro-aimants, tourne un induit formé d'un cylindre de bois monté sur un axe et sur lequel sont disposées quatre petites tiges de fer doux, encastrées dans des rainures creusées suivant quatre génératrices à angle droit du cylindre. Un frettage en fil de soie gommé laqué maintient les tiges de fer en place.

Quand le synchronisme est établi, deux des tiges d'améthyles se présentent en regard des pôles, lorsque le courant est à son maximum positif ; les deux autres tiges se présentent devant

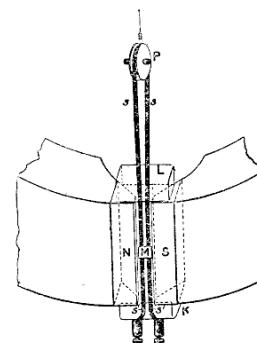


FIG. 224. — Cadre galvanométrique de l'oscillographie Duddell.

les mêmes pôles, à la demi-période suivante, de sorte que l'induit fait une demi-révolution par période et tourne à la moitié de la vitesse correspondant au synchronisme.

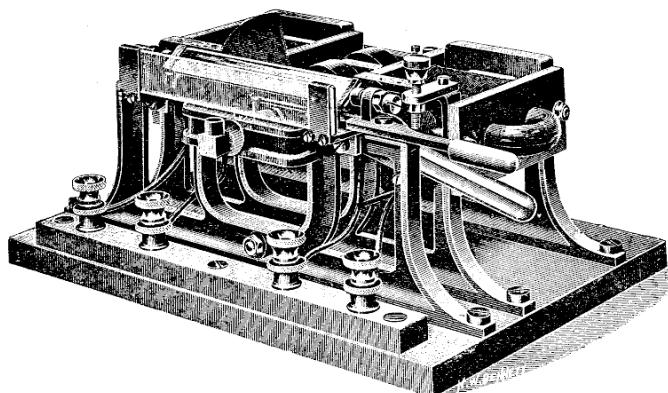


FIG. 225. — Moteur synchrone de l'oscillographe Duddell.

Cet induit agit, par l'intermédiaire d'une came, sur le miroir monté sur pointes et lui fait décrire un mouvement oscillatoire synchrone avec le courant et d'une amplitude de quelques degrés.

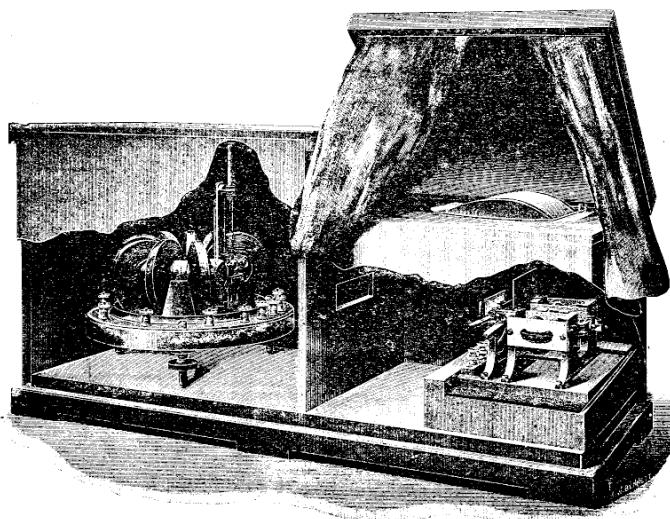


FIG. 226. — Installation de l'oscillographe Duddell.

Les poignées que l'on aperçoit sur la figure 225 servent, l'une à régler le miroir, l'autre à faciliter l'obtention du synchronisme du moteur.

La figure 226 montre la disposition générale des instruments.

L'oscillographe, placé au fond d'une caisse en bois, reçoit la lumière venant d'une lanterne à projection. Le pinceau lumineux a la forme d'une fente étroite et longue.

En venant se réfracter finalement dans la lentille cylindrique, ce pinceau se réduit à un point très brillant qui dessine la courbe du courant.

Sur la surface cylindrique de la lentille, il est possible de tendre une feuille de papier photographique ou du papier quadrillé transparent. Dans ce dernier cas, on trace la courbe avec un crayon, en s'abritant sous le voile noir qui surmonte la caisse du moteur synchrone.

Le courant continu qui excite l'électro-aimant du galvanomètre est de 0,25 ampère sous 100 volts.

Des fils fusibles, placés dans de petits tubes de verre, servent à protéger l'oscillographe.

Rhéographe Abraham. — Cet instrument, construit et exposé par M. J. Carpentier, de Paris, est destiné à observer et à enregistrer les courbes des courants alternatifs.

Il comporte trois organes essentiels : le rhéographe ou galvanomètre à période d'oscillation très longue, la table de compensation et le moteur synchrone avec l'appareil d'observation.

Le rhéographe est un galvanomètre d'Arsonval dont le cadre mobile, de très faibles dimensions, est placé dans le champ magnétique très puissant d'un électro-aimant. La période des courants à étudier doit être très petite par rapport à celle d'oscillation du rhéographe : c'est donc l'inverse de ce que doit réaliser le galvanomètre-oscillographie.

La table de compensation comprend plusieurs organes qui ont pour mission d'envoyer dans le cadre mobile du rhéographe des courants proportionnels au courant à étudier, mais convenablement transformés.

Le cadre mobile, pour suivre exactement les oscillations rapides d'un courant alternatif, doit être soumis continuellement à des accélérations à tout moment proportionnelles à la valeur instantanée du courant.

Cette condition est réalisée en envoyant dans le cadre non pas le courant lui-même, mais un courant doublement transformé ; le double transformateur prévu à cet effet constitue la partie principale de la table de compensation.

Comme le montre schématiquement la figure 227, le courant à étudier passe dans le primaire A d'un transformateur sans fer et constitué par une bobine plate de grand diamètre. Le secondaire B se trouve placé au-dessus de lui.

Le second transformateur a ses enroulements primaire et secondaire C et D roulés sur une même bobine placée au centre du premier transformateur et susceptible de prendre des inclinaisons variées par rapport à celui-ci. Les enroulements du second transformateur ont, d'ailleurs, même nombre de spires.

Au courant de second ordre induit dans le secondaire D, on superpose une fraction du courant principal et un courant n'ayant subi que la première transformation.

Pour y parvenir, on règle la position des curseurs E, F mobiles sur une résistance R non inductive, qui se trouve ainsi montée en série avec le deuxième secondaire D et le cadre du rhéographe. On obtient ainsi dans ce dernier la fraction du courant principal nécessaire.

Quant au courant n'ayant subi que la première transformation, il est développé dans le secondaire D par l'induction provenant du primaire A. On règle la valeur du courant ainsi induit en D en inclinant convenablement la bobine D.

Pour arriver à une compensation rigoureuse, on observe la forme d'un courant périodique-ment interrompu et l'on agit sur les curseurs E, F et sur l'inclinaison de la bobine D, jusqu'à ce que la courbe obtenue soit celle que doit présenter un courant continu intermittent, tel que le fournit un diapason fonctionnant comme interrupteur.

L'appareil d'observation se compose d'une chambre photographique et d'un système de

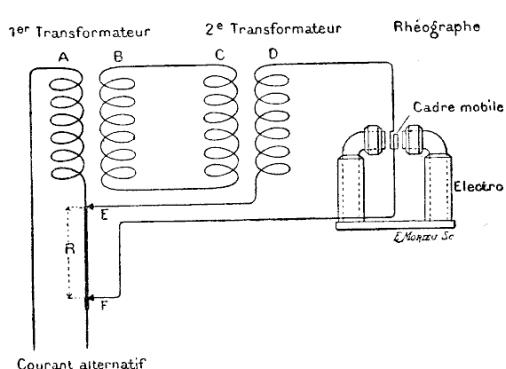


FIG. 227. — Disposition schématique du rhéographe Abraham.

deux fentes, l'une verticale et fixe, l'autre déplaçable et qui, placée perpendiculairement à la première, donne un point lumineux.

En réalité, la deuxième fente est remplacée par un système de fentes tracées sur un disque tournant et ayant la forme de développantes de cercle.

Un moteur synchrone, alimenté par le courant à étudier, fait mouvoir ce disque.

Grâce à la forme des fentes de celui-ci, le point lumineux se déplace verticalement et proportionnellement au temps quand le disque tourne.

Le point lumineux, mobile verticalement, est réfléchi sur le miroir du rhéographe qui le déplace horizontalement, suivant la valeur de l'intensité du courant, et renvoie sur l'écran un point qui, donnant la résultante des mouvements verticaux et horizontaux, fournit la courbe du courant. L'arbre du moteur synchrone porte un collecteur qui permet de le lancer avec du courant continu à la vitesse du synchronisme pour l'accrocher. Cet arbre porte aussi un interrupteur qui sert à couper périodiquement le courant de deux ou trois accumulateurs intercalés à la place de la source à étudier, au moment du réglage, dans le circuit de la table de compensation.

Le courant périodiquement interrompu ainsi obtenu sert à régler convenablement la position des curseurs E, F et l'inclinaison du second transformateur.

La figure 228 montre schématiquement l'ensemble de l'installation du rhéographe Abraham. A l'Exposition où il fonctionnait, il y avait deux rhéographes: l'un servait pour déterminer la courbe d'intensité d'un courant alternatif et l'autre pour la courbe de sa tension. Une lampe, accompagnée de deux prismes à réflexion totale *b*, *c*, envoie deux

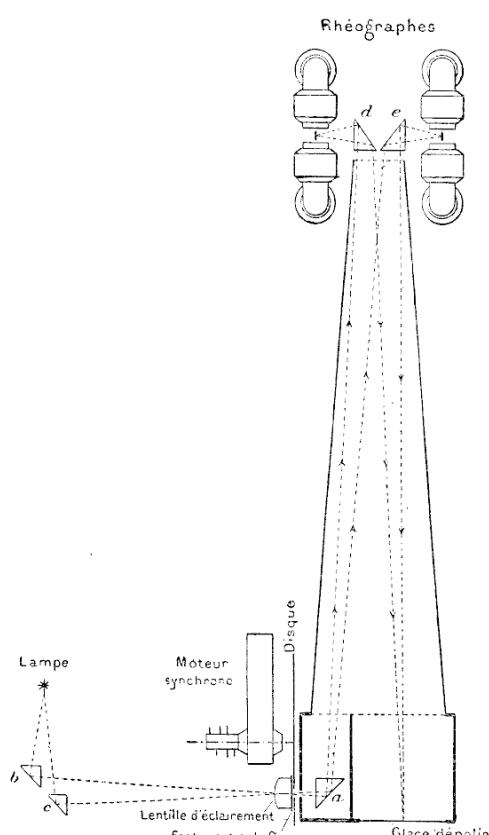


FIG. 228. — Installation du rhéographe Abraham.

rayons qui, après avoir traversé un jeu de lentilles condensatrices, la fente verticale fixe et celles du disque, sont renvoyés par le prisme *a* sur les prismes *d*, *e*. Les rayons frappent les miroirs des rhéographes, situés à gauche et à droite, et reviennent, par les prismes *d*, *e*, pour tomber sur l'écran, où ils forment deux images ayant le même axe des temps.

Chaque rhéographe est accompagné de sa table de compensation et, disposant ainsi d'un appareil double, on peut observer et photographier simultanément les courbes de tension et d'intensité des courants alternatifs.

Enregistreur de courbes pour courants alternatifs. — Cet instrument, construit par la maison Stieberitz, de Dresde, comprend un galvanomètre-oscillographe du genre de l'appareil Blondel.

C'est un galvanomètre du système dit à *arête de poisson* et qui se compose d'un aimant vertical en fer à cheval à la partie supérieure duquel est fixée la bobine.

Au centre de celle-ci se trouve l'équipage mobile formé d'une petite lame d'acier coupée dans un ressort de montre. Sur celle-ci est fixé un miroir minuscule. La durée d'oscillation de cet équipage se réduit à 0,0001 seconde.

Le point lumineux brillant, fourni par une lentille éclairée par une lampe à arc, frappe le miroir du galvanomètre et revient sur une feuille de papier sensible.

L'appareil dessine une courbe complète toutes les deux secondes pour un courant de fréquence de 100 périodes par seconde.

Le moteur synchrone qui fait dérouler le papier ne présente pas de particularités. La courbe qui met deux secondes à s'enregistrer représente la valeur moyenne de 100 périodes consécutives.

Appareil du professeur Hoor pour relever les courbes de courants alternatifs. — Cet instrument, construit et exposé par la Société Ganz, de Budapest, permet de relever par points les courbes de courants périodiques; il est basé sur la méthode du contact instantané, imaginée par M. Joubert en 1889. Un anneau en bronze est entraîné par un moteur synchrone ou au moyen d'un fort pointeau triangulaire enfoncé dans le bout de l'arbre de l'alternateur dont on veut relever les courbes de courant. Sur cet anneau est fixé un cylindre d'ébonite portant les contacts. Les frotteurs sont fixes et l'on peut, au moyen d'une graduation, relever leur position exacte.

Les lectures se font, comme d'ordinaire, avec un galvanomètre apériodique et un condensateur.

L'appareil porte deux systèmes de contacts, ce qui permet de relever la courbe de tension en même temps que celle de l'intensité.

L'instrument complet ne pèse que 3,5 kilogrammes et peut être tenu à la main comme un compteur de tours.

Deux observateurs peuvent relever les courbes en quelques minutes. L'un observe le galvanomètre et l'autre déplace les balais autour du tambour mobile en notant chaque fois l'angle marqué par un index.

IX

INSTRUMENTS DE MESURES MAGNÉTIQUES

Les essais magnétiques des fers et aciers, entrant dans la construction des machines et appareils électriques, tendent à se généraliser, depuis, surtout, que des instruments industriels ont été réalisés, permettant ainsi aux constructeurs d'effectuer les essais par des méthodes faciles.

Les indications données par ces instruments ont une réelle valeur et les renseignements qu'ils fournissent peuvent éviter aux constructeurs de graves mécomptes.

Ces instruments sont les *perméamètres* et les *hystérésimètres*.

Pour déterminer la perméabilité et le coefficient d'hystérésis d'un échantillon de fer par la méthode la plus précise, il est indispensable d'avoir recours à la méthode balistique ; mais cette méthode nécessite des opérations assez longues ; aussi les constructeurs ont-ils cherché à réaliser des instruments, appelés *perméamètres*, qui permettent de comparer rapidement la perméabilité d'un échantillon quelconque à un échantillon type, préalablement étudié une fois pour toutes par la méthode balistique. De même, les hystérésimètres servent à comparer les pertes hystérotiques de deux échantillons, dont l'un, servant de type, a été étudié par la méthode balistique.

PERMÉAMÈTRES

Perméamètre d'induction Hopkinson. — M. J. Carpentier avait construit et exposé un perméamètre Hopkinson dont la figure 229 montre la disposition schématique.

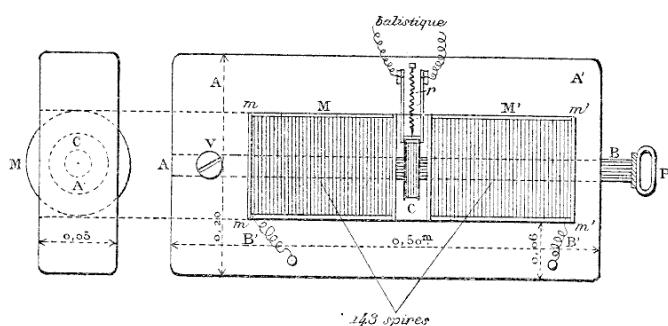


Fig. 229. — Perméamètre d'induction Hopkinson.

Cet instrument est constitué par un cadre en fer forgé A'A'B'B', qui reçoit l'échantillon AB à étudier, placé dans un évidement pratiqué à cet effet.

Cet échantillon a la forme d'un barreau cylindrique et pénètre dans les deux petits côtés du cadre, à travers des trous percés à cet effet dans la masse. L'échantillon doit entrer à frottement doux dans ces trous, de manière à réduire au minimum la résistance des joints en ces points. Il est coupé en son milieu et les surfaces en contact sont parfaitement dressées.

Deux bobines magnétisantes M, M' enroulent les deux parties de l'échantillon ; elles sont fixées

au cadre par leurs joues m, m' et sont séparées par un espace occupé par une petite bobine plate C. Cette bobine recouvre aussi l'échantillon à l'endroit où il est coupé et un dispositif à ressort r fait sortir brusquement la bobine de sa place, lorsqu'en tirant sur la poignée P on retire la partie de droite du barreau, dont la partie de gauche doit rester en place, maintenue solidement par le serrage de la vis V.

La bobine C porte un enroulement en fil fin qu'on relie à un galvanomètre balistique.

Pour effectuer une mesure de perméabilité, on met en place la bobine C, appelée *bobine d'épreuve*, autour de l'échantillon et on l'y maintient en poussant sur la poignée P de manière à bien appliquer l'une contre l'autre les sections des demi-éprouvettes.

On excite les bobines M, M' et l'on mesure l'intensité du courant. On tire ensuite vivement sur la poignée P; l'arrachement se produit, et la bobine C est brusquement rappelée par son ressort r.

Pendant ce déplacement, elle subit une variation de flux de Φ à zéro, variation qui se traduit par une certaine élongation ε du galvanomètre balistique.

En répétant l'expérience un certain nombre de fois avec des courants d'intensité différente dans les bobines M, M', on obtient une série d'élargissements qui permettent de tracer la courbe des inductions \mathcal{B} en fonction de la force magnétisante \mathcal{J} . Pour chaque groupe de valeurs de \mathcal{B} et de \mathcal{J} ,

on obtient la perméabilité $\mu = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{J}}$.

Avec cet instrument, on peut également employer un échantillon d'une seule pièce. Dans ce cas, la bobine C reste constamment enfilée sur le barreau et on produit la variation de flux en inversant brusquement le sens du courant qui traverse les bobines M, M'.

La variation de flux est $+\Phi$ à $-\Phi$; elle est donc double de celle obtenue dans le cas précédent. L'élargissement du galvanomètre, pour une même intensité I du courant magnétisant, est donc également doublée; cette disposition est plus avantageuse que la précédente.

Le cadre A'B' étant de grande section et d'une certaine longueur, on peut, sans trop d'erreur, négliger sa réticulante propre. Il est cependant possible d'en tenir compte dans l'expression de \mathcal{J} en augmentant, dans le calcul, la longueur l de la barre de 30'0 environ.

Perméamètre à arrachement Carpentier. — Cet instrument, construit par M. J. Carpentier, donne rapidement des résultats, lorsqu'on ne recherche pas une grande précision. Il se compose (fig. 230) d'un cadre en fer P de section notablement plus grande que celle de l'échantillon AB qui affecte la forme cylindrique. Ce cadre est analogue, d'ailleurs, à celui de l'appareil d'Hopkinson. En A, l'extrémité de l'échantillon est parfaitement dressée ainsi que la portion du cadre contre laquelle elle s'applique. En B, l'échantillon traverse à frottement doux l'épaisseur du cadre P. Une bobine magnétisante M entoure l'échantillon qui se termine par une pince B.

L'effort de traction nécessaire pour produire l'arrachement s'obtient en tournant la manivelle m qui commande la vis V.

Ce mouvement de rotation produit le déplacement d'un écrou D, muni d'un index mobile devant la règle divisée R.

En se déplaçant vers la gauche, l'écrou D tire en B sur l'échantillon par l'intermédiaire des balanciers BC, DC' articulés en o et o'. La tension du ressort peson R' mesure l'effort.

Pour faire un essai, on excite la bobine avec un courant d'intensité connue et on applique exactement en A l'extrémité de l'échantillon, de manière à avoir une répartition uniforme du flux dans toute la surface de contact A. On tourne lentement la manivelle m jusqu'au moment où se produit l'arrachement.

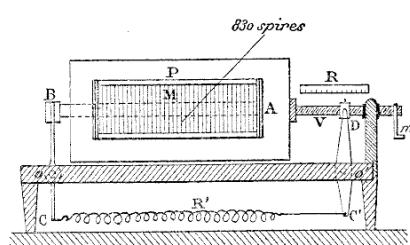


FIG. 230. — Perméamètre à arrachement J. Carpentier.

La valeur de \mathcal{F} est donnée par les indications de l'ampèremètre et la connaissance du nombre de spires de la bobine.

La perméabilité a pour expression :

$$\mu = \sqrt{\frac{8\pi \cdot 10^{-8} i}{\mathcal{F}^2 S}},$$

f étant l'effort d'arrachement mesuré en R et exprimé en grammes et S étant la section en cm^2 de l'échantillon.

$\mathcal{F} = 0,4 \pi n i$, n étant le nombre de spires par centimètre de la bobine M et i étant l'intensité du courant en ampères. Toute la précision dépend du dressage plus ou moins parfait des surfaces en contact A.

Pour une force magnétisante \mathcal{F} donnée, l'effort est, en effet, *minimum* quand le flux est uniforme en A et l'on voit que l'on peut trouver pour f , et, par conséquent, pour μ , des valeurs d'autant plus élevées que le dressage des surfaces est moins parfait et le contact en A moins intime.

Comme c'est le cas qui peut se présenter le plus fréquemment, il faut s'attendre à trouver souvent des perméabilités un peu trop fortes.

Perméamètre de torsion, modèle J. Carpentier. — Cet instrument, construit et exposé par M. J. Carpentier, est destiné à la mesure rapide de la perméabilité des échantillons de fer.

Comme le montre la figure 231, il se compose essentiellement d'un anneau de fer doux C, dont la section transversale $abcd$ est très grande par rapport à celle de l'échantillon à essayer.

L'anneau est coupé de façon à laisser subsister en D et E deux entrefer de même largeur l . En D, l'entrefer est rempli par une cale en bronze, tandis qu'en E il est occupé par une petite aiguille aimantée f , dont deux butées limitent les déplacements.

Cette aiguille est suspendue par des fils de torsion R qu'on manœuvre en agissant sur un bouton moletté F.

L'aiguille porte un index permettant d'apprécier son orientation. Elle se déplace dans de l'huile, celle-ci servant à rendre les oscillations apériodiques. Toute cette partie de l'appareil est montée dans un tube T' qui se place en E perpendiculairement au plan de l'anneau C. L'échantillon, de dimensions données, est figuré en AB. Il se place suivant un diamètre AB perpendiculaire à l'axe DE des entrefer et se trouve entouré d'une bobine magnétisante M.

Pour mettre cet échantillon en position, on l'enfile dans la bobine en le faisant passer par les trous A', B', percés dans l'anneau.

Quand on excite la bobine M, il se développe un flux qui traverse le barreau AB et les deux demi-anneaux.

Les flux dans ces demi-anneaux sont égaux à cause de l'égalité des entrefer D, E et valent chacun la moitié du flux total dans l'échantillon.

Le flux qui traverse l'entrefer E tend à orienter l'aiguille f parallèlement à lui. On donne aux fils R une torsion suffisante pour ramener l'aiguille dans une direction r perpendiculaire à celle du flux. Cette torsion mesure la valeur de ce dernier et elle lui est proportionnelle.

L'appareil est complété par une boîte de résistance à manettes figurée en R' et qui comprend, en outre, un inverseur I et un ampèremètre F. Ce dernier a une graduation en ampères qui sert à vérifier son étalonnage et porte, de plus, une graduation en gauss, tracée en fonction de l'intensité du courant et du nombre de spires de la bobine M.

Pour tenir compte de la portion de force magnétisante \mathcal{F} nécessaire à l'aimantation de l'anneau C, force qui est constante pour une induction μ donnée, il faut faire subir une correction aux lectures \mathcal{F} de l'ampèremètre. Il est également nécessaire de tenir compte de l'influence de l'hystéresis.

A cet effet, la tête de torsion F porte deux index diamétraux i, i' , mobiles simultanément devant les deux graduations tracées sur le tambour T.

L'une des graduations fait connaître directement les valeurs de β et l'autre celle de la constante C qu'il faut, pour chaque valeur de β , retrancher des lectures \mathcal{J} .

D'autre part, le tambour T peut tourner sur lui-même à frottement dur, afin de permettre le déplacement des zéros de ses graduations.

Voici comment on procède à une mesure :

L'échantillon étant mis en place, on fait passer un courant dans la bobine M et on règle sa valeur au moyen de la boîte de résistances R' , de manière à amener l'ampèremètre à une valeur approximative \mathcal{J} de la force magnétisante choisie. On tourne la tête F jusqu'à ce que l'aiguille f arrive à son repère r , dans une position perpendiculaire à celle du flux en E. On amène le zéro de la graduation β du tambour sous l'index i et on inverse le courant.

Il suffit alors de tordre les fils R de suspension de l'aiguille f jusqu'à ce que l'index de celle-ci revienne devant son repère r . Pendant cette opération, on a soin de ne plus toucher au tambour T.

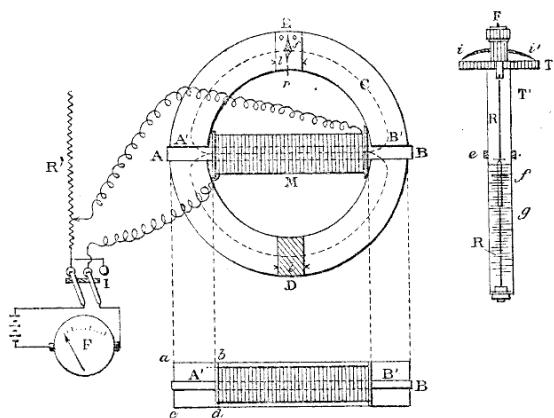


FIG. 231. — Perméamètre de torsion J. Carpentier.

L'index i fait connaître directement la valeur de β , tandis que l'index i' indique la correction C qu'il faut retrancher de la lecture \mathcal{J} sur l'ampèremètre. La perméabilité correspondant à la force magnétisante $\mathcal{J} - C$, employée réellement pour l'échantillon seul, est alors :

$$\mu = \frac{\beta}{\mathcal{J} - C}.$$

On peut tracer une courbe des valeurs de μ , en répétant l'expérience un certain nombre de fois avec des valeurs de $\mathcal{J} - C$ convenablement choisies.

L'échantillon, ajusté à frottement doux dans l'anneau C, peut être cylindrique ou de forme prismatique ; le courant magnétisant est fourni par une pile constante ou par quelques accumulateurs.

En pratique, la bobine M porte deux enroulements, de chacun 730 spires, qui peuvent être groupés en série ou en parallèle. Le diamètre moyen de l'anneau C est d'environ 15 cm.

Un épaulement e , soudé au tube T', sert à amener l'ensemble de l'aiguille f et de ses accessoires dans une position bien déterminée lorsqu'on le met en place dans l'ouverture E.

L'appareil est livré avec le barreau type qui, étudié par le constructeur, a servi à étalonner le perméamètre.

Il y a lieu de noter que l'aiguille f , restant toujours, grâce aux butées, à peu près perpendiculaire à la direction du flux, n'en subit pour ainsi dire pas l'influence. Son aimantation propre reste donc très longtemps constante ; d'ailleurs, si elle variait, il serait facile de déterminer la correction qu'il faudrait faire subir aux mesures. Il suffirait, en effet, de faire un essai avec le barreau étalon dont le constructeur fournit la courbe des perméabilités.

Balance magnétique du Bois. — Cet instrument, dont les figures 232 et 233 montrent une vue d'ensemble et un croquis théorique, est construit et exposé par la maison Siemens et Halske.

Il se compose de deux gros blocs en acier C, C', dont les parties supérieures ont même section et sont parfaitement dressées.

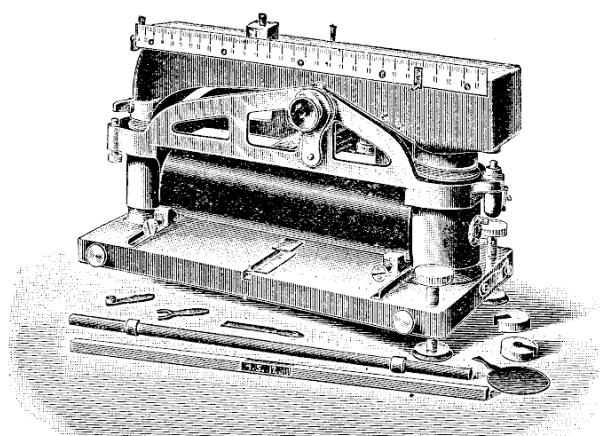


FIG. 232. — Balance magnétique du Bois.

L'échantillon AB, entouré d'une bobine magnétisante M, réunit les deux blocs qu'il traverse.

Afin que le contact soit intime entre le barreau et les blocs, le barreau est serré entre deux demi-cônes en fer, qu'on visse entre celui-ci et les blocs au moyen d'une clé.

Au-dessus des blocs C, C', se trouve une masse DE en acier coulé, montée sur couteaux I. Le côté E est plus lourd que le côté D, afin d'obtenir l'équilibre de ce système de fléau malgré la légère excentration des couteaux I supportés par la traverse H.

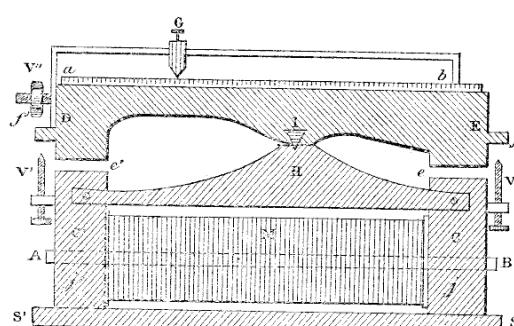


FIG. 233. — Détails de la balance magnétique du Bois.

En regard des parties supérieures des blocs C, C', le fléau se termine par des épanouissements bien dressés et de même section que les blocs.

A la partie supérieure du fléau, on voit une tige le long de laquelle on peut déplacer le contrepoids G, dont l'index est mobile devant les divisions d'une règle graduée ab.

Les surfaces en regard des blocs C, C' et des épanouissements du fléau ne doivent jamais venir au contact. Il reste toujours entre ces parties un entrefer, dont l'épaisseur est de 1 mm du côté où le fléau est incliné.

Une cale de 1 mm d'épaisseur sert à vérifier cette condition.

Pour régler la balance, on place la cale en e, puis on appuie en E sur le fléau, de manière à la serrer. On agit enfin sur la vis V, jusqu'à ce qu'elle vienne toucher la butée f.

On opère de même du côté D, en transportant la cale en e' et en agissant sur la vis V après avoir appuyé en D.

Le contrepoids G étant au zéro de sa graduation et la bobine M n'étant pas excitée, on amène la balance à l'équilibre en réglant la position du petit contrepoids V''.

Pour faire une mesure, on excite la bobine M avec un courant d'intensité connue. L'équilibre est détruit et on le ramène en déplaçant convenablement le contrepoids G.

La valeur de β est proportionnelle à \sqrt{d} , d étant la distance du poids G au zéro de l'échelle ab.

Les flux en ee' sont égaux ; si, cependant, le fléau s'infléchit du côté e' quand on excite la bobine, cela tient à ce que l'excentrage des couteaux I rend inégaux les moments des couples.

L'échelle des indications peut être étendue, en ajoutant au poids G des rondelles de masse connue, visibles en bas de la figure 232, à côté de la cale de réglage.

Les échantillons sont cylindriques ou prismatiques. Dans les deux cas, leur section doit être de 49 mm^2 (diamètre du cylindre, 7,9 mm ; côté du carré, 7 mm).

Pour corriger les erreurs dues à l'hystérisis des blocs CC' et du fléau DE, on porte les abscisses, dans le tracé des résultats, à partir d'une courbe située au-dessus de l'axe des x .

Cette courbe, dressée pour chaque instrument, est fournie par le constructeur.

Dans l'instrument exposé et dont la longueur est d'environ 30 cm, des boutons placés à proximité des couteaux permettent d'immobiliser le fléau pendant le transport. Les blocs sont indépendants du support du fléau et peuvent recevoir un petit déplacement au moyen de vis.

Ce déplacement a pour objet de les amener exactement à l'aplomb des épanouissements du fléau et d'éviter ainsi des efforts autres que ceux dirigés suivant la verticale. Un jeu de clés de serrage et des cônes pour barres cylindriques et carrées accompagnent cet instrument qui, fournit des résultats exacts à 1/0 près, est véritablement remarquable de précision, malgré sa simplicité.

Perméamètre du Dr Hubert Kath. — Le principe sur lequel est basé cet instrument (fig. 234) a été indiqué en 1886 par M. Marcel Deprez. En Allemagne, le Dr Köpsel a également employé le même principe qui consiste à renverser la destination du galvanomètre Deprez d'Arsonval.

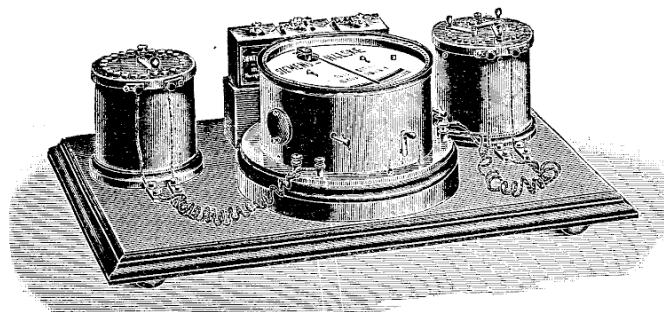


Fig. 234. — Perméamètre Hubert Kath.

Le Dr Hubert Kath a donné à l'instrument que construit la maison Siemens et Halske les dispositions de détail qu'il présente maintenant.

Comme le montre la figure 235, cet instrument se compose essentiellement d'un galvanomètre à cadre mobile, dont l'aimant est remplacé par un circuit magnétique excité par une bobine M.

L'échantillon, qui a la forme d'un barreau cylindrique AB, pénètre dans les trous percés à travers deux gros blocs de fer C, D. Ces blocs viennent embrasser le cadre mobile M et la réticulante de l'entrefer est diminuée par la présence du noyau de fer E.

Le barreau, bien ajusté, entre à frottement doux dans les ouvertures des blocs et des vis de pression p, p' le maintiennent en place.

On fait passer dans le cadre mobile et par les ressorts spiraux antagonistes un courant d'intensité constante fourni par une pile S de trois éléments à liquide immobilisé, courant qu'un milliampèremètre i permet de mesurer.

Cela fait, si on excite la bobine M , le cadre est dévié proportionnellement au flux dans l'entrefer, c'est-à-dire au flux développé dans le barreau.

Pour éliminer l'effet dû au flux propre des blocs C, D , ceux-ci sont recouverts de bobines M', M'' , montées en série avec la bobine M et qui sont reliées de manière à diminuer le flux total exactement d'une quantité égale au flux dû aux blocs eux-mêmes.

Quand les bobines M, M', M'' sont excitées et que le barreau AB est enlevé, le cadre m , bien qu'étant traversé par un courant, ne doit pas dévier. Cette constatation indique que les bobines compensatrices M', M'' produisent exactement leur effet.

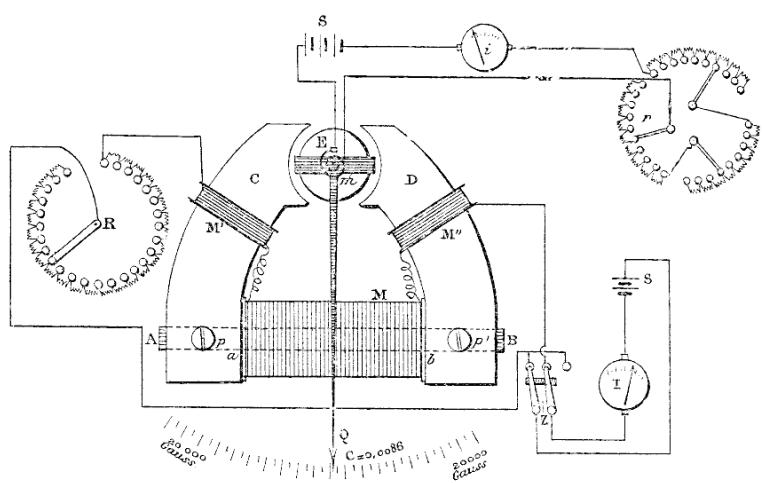


Fig. 235. — Schéma des connexions du perméamètre Hubert Kath.

Un rhéostat r à trois manettes permet de régler avec précision l'intensité du courant dans le cadre.

Les manettes du rhéostat r , visibles à droite de la figure 235, agissent respectivement sur des centaines, dizaines et unités de résistance ; le réglage de l'intensité du courant dans le cadre peut donc être très précis.

A gauche de la figure, on aperçoit un autre rhéostat R servant à régler l'intensité du courant magnétisant fourni par quelques accumulateurs S . Un inverseur Z , placé dans le circuit des bobines M, M', M'' , permet d'éliminer les effets dus à l'hystérosis.

Pour connaître l'intensité i qu'il faut donner au courant qui traverse le cadre mobile m , on divise un coefficient (gravé sur le cadran du perméamètre) par la section du barreau essayé.

Le coefficient est variable d'un instrument à l'autre, mais il est toujours assez voisin de 0,0086. Si la section du barreau est de 1 cm^2 , par exemple, l'intensité i devra être de 0,0086 ampère.

Afin d'éviter tout calcul dans la détermination de la force magnétisante, la longueur active ab du barreau est exactement de $42,56 \text{ cm} = 4\pi \text{ cm}$. D'autre part, la bobine M a 4 000 spires, de telle sorte que la force magnétisante \mathcal{F} vaut 100 fois l'intensité en ampères du courant I circulant dans les bobines M, M', M'' .

Avec deux accumulateurs, la force magnétisante peut atteindre 150 gauss ; elle est doublée au besoin par l'emploi de quatre accumulateurs.

La résistance totale des trois bobines M , M' , M'' est de 2,66 ohms environ. Pour faire un essai, on mesure la section du barreau à étudier, afin de déterminer l'intensité du courant constant à faire circuler dans le cadre mobile m , et on règle ce courant. On excite les bobines M , M' , M'' et on s'assure que l'aiguille Q que porte le cadre ne dévie pas.

On met l'échantillon en place, puis on fait varier l'intensité du courant I dans les bobines M , M' , M'' . Ceci s'obtient en amenant la manette du rhéostat R successivement sur chaque plot. Pour chaque position de R , on note l'intensité du courant et la déviation de l'aiguille Q . On recommence finalement l'opération après avoir inversé le courant magnétisant.

Les valeurs obtenues servent à tracer la courbe de ϑ en fonction de \mathcal{I} , courbe dite boucle d'hystéresis. L'échantillon cylindrique peut être remplacé par un autre, formé de tôles de fer, dont on superpose le nombre voulu pour avoir une section équivalente ou à peu près. La section de chaque tôle est mesurée séparément au palmer et l'intensité du courant dans le cadre mobile est réglée d'après la section totale trouvée pour l'échantillon.

Perméamètre à spirale de bismuth. — Avant de décrire cet instrument, exposé par MM. Hartmann et Braun, il est nécessaire de dire quelques mots de la spirale de bismuth, que représente la figure 236.

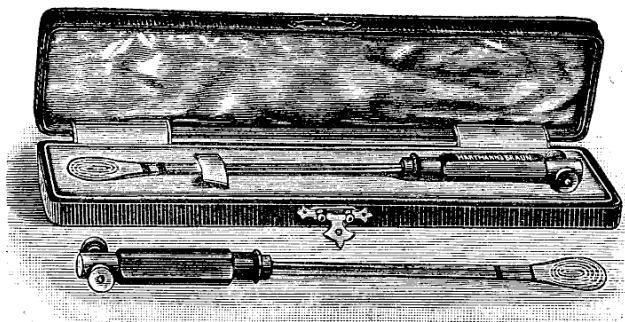


FIG. 236. — Spirale de bismuth du perméamètre Hartmann et Braun.

Cet instrument est formé d'un fil fin isolé en bismuth chimiquement pur, roulé en forme de spirale plate et protégé par deux petits disques de mica collés sur les faces de la bobine. Le diamètre de cette dernière est de 18 mm et son épaisseur est seulement de 1 mm.

La spirale de bismuth a ses extrémités reliées aux deux bornes placées sur le manche qui lui sert de support.

Grâce à ses faibles dimensions, la bobine peut être introduite dans l'entrefer d'une dynamo quelconque dont l'inducteur et l'induit sont traversés par des courants, l'induit étant naturellement immobilisé.

Quand la spirale de bismuth est traversée par un flux de force magnétique, sa résistance varie et la variation relative de cette résistance donne une mesure du flux, lorsque l'instrument a été convenablement étalonné.

La variation relative de résistance est d'environ 5 000 par 1 000 gauss. Elle est exactement indiquée par une courbe (fig. 237) livrée par le constructeur en même temps que la spirale.

Pour mesurer la variation relative de la résistance de la spirale, on fait usage d'un pont schématiquement représenté sur la figure 238.

Il se compose de deux fils calibrés, le long desquels peuvent se déplacer des curseurs S_1 , S_2 , S_3 , mobiles devant des règles divisées.

En E est une résistance exactement égale à celle de la spirale de bismuth, cette résistance étant celle qui correspond à la température la plus basse à laquelle on s'en servira.

Entre A et B se trouve une bobine de 1 ohm.

La pile du pont se branche entre les points marqués « Batt », le galvanomètre entre ceux marqués « Galy » et la spirale entre les curseurs S_1 , S_3 .

La spirale de bismuth étant hors de tout champ magnétique, on met le curseur S_1 au zéro de son échelle et le curseur S_2 devant le chiffre qui correspond à la température de la spirale. Les divisions de la règle relative au curseur S_2 sont tracées en rouge.

On déplace le curseur S_3 jusqu'à ce que le galvanomètre reste au zéro.

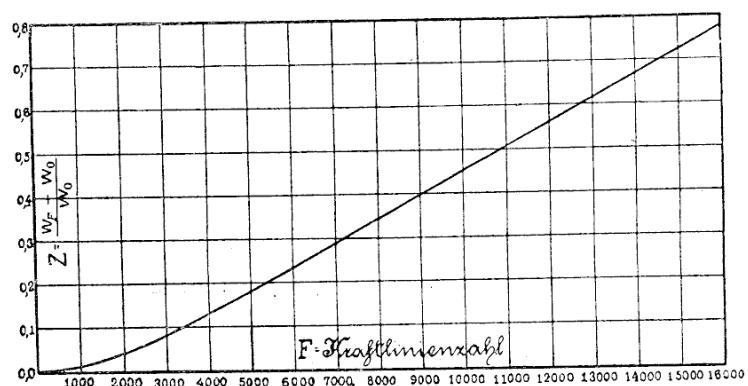


FIG. 237. — Courbe des flux en fonction de la variation de résistance relative de la spirale de bismuth.

Les curseurs S_2 , S_3 restant à leur place, on soumet la spirale aux flux à mesurer et on constate que, pour ramener le galvanomètre au zéro, il faut déplacer le curseur S_1 jusqu'en C, par exemple.

La distance OC exprime la *variation relative* de la résistance de la spirale. Il reste à porter cette valeur en ordonnées sur la courbe (fig. 237) pour que l'abscisse du point correspondant fasse connaître le flux qui traversait le fil de bismuth.

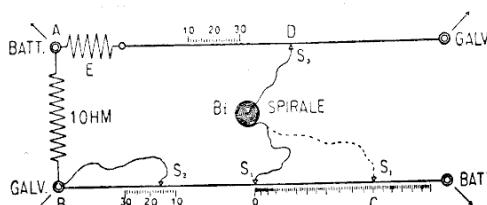


FIG. 238. — Schéma des connexions du pont double employé pour mesurer la variation de résistance de la spirale de bismuth.

Le perméamètre Hartmann et Braun est représenté figure 239. Il se compose d'un cadre en fer de grande section, dont les côtés les plus longs sont légèrement courbés.

Ce cadre, qui rappelle beaucoup celui de l'instrument d'Hopkinson, porte deux trous à travers lesquels on passe à frottement doux l'échantillon à expérimenter.

Celui-ci, comme on peut le voir en haut de la figure sur la coupe du cadre, est en deux morceaux séparés par la bobine en fil de bismuth dont l'épaisseur est de 1 mm.

Afin que la distance des deux parties de l'échantillon soit toujours la même, la bobine de bismuth est protégée par des disques en laiton et des ressorts en boudin font appuyer les morceaux de l'échantillon contre ces disques.

Une bobine magnétisante entoure le barreau ainsi que la spirale.

Quand on excite cette bobine, la résistance du bismuth varie et on mesure cette variation comme il a été dit ci-dessus.

Connaissant l'intensité du courant d'excitation, le nombre de spires de la bobine magnéti-

sante et la variation relative de résistance de la spirale, il est facile d'obtenir les valeurs de \mathfrak{B} en fonction de \mathfrak{J} .

La figure 240 montre l'aspect d'ensemble de l'instrument complet.

Le cadre en fer est placé au milieu d'une planchette de 1,10 m de long.

En avant et en arrière cette planchette se trouvent les fils calibrés du pont ; S_1 , S_2 , S_3 sont les trois curseurs.

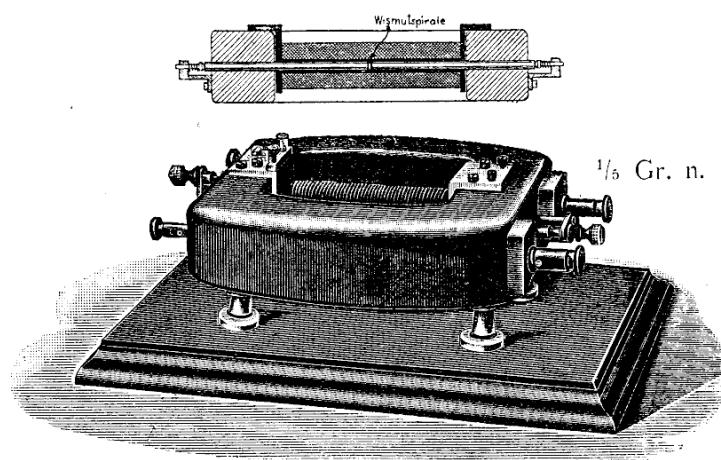


FIG. 239. — Perméamètre [Hartmann et Braun].

A droite, on aperçoit le galvanomètre apériodique et la clé T à deux contacts successifs servant aux mesures de résistance.

A gauche, on remarque l'ampèremètre destiné à mesurer l'intensité du courant magnétisant, courant qu'on peut interrompre en S.

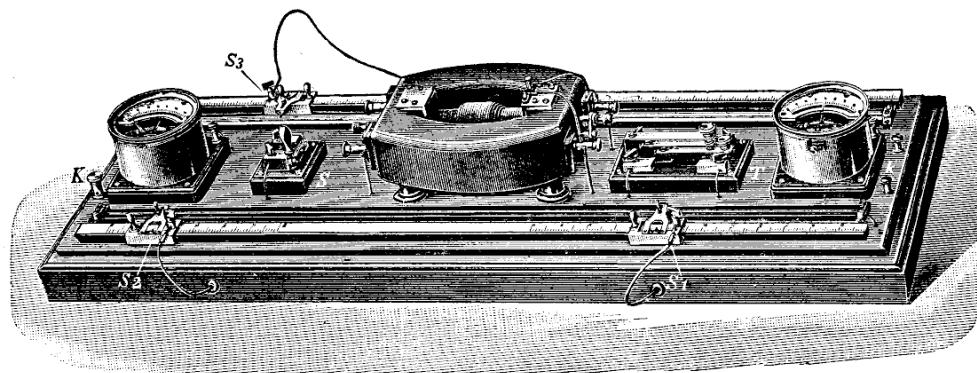


FIG. 240. — Instrument complet pour la détermination des qualités magnétiques du fer.

Ce courant, fourni par quelques accumulateurs, arrive aux bornes K, la pile du pont étant reliée aux bornes \mathfrak{k} .

Les indications fournies par cet instrument sont très exactes et la manipulation en est fort simple.

Il y a lieu de noter que les essais doivent être cependant exécutés rapidement afin d'éviter tout échauffement de la bobine de bismuth dont la température serait alors inconnue. Si ce fait se produisait pendant les expériences, les résultats seraient naturellement erronés, puisque la

variation relative de résistance ne serait plus exclusivement due à l'action du flux sur le bismuth.

La longueur de la bobine magnétisante, mesurée entre les faces internes du cadre, est exactement de 12,56 cm.

Le diamètre du barreau à essayer est de 1 cm; les faces en contact avec la spirale de bismuth doivent être soigneusement dressées.

HYSTÉRÉSIMÈTRE

Hystérésimètre Blondel-Carpentier. — Un seul de ces instruments figurait à l'Exposition: c'était celui de MM. Blondel-Carpentier, construit et exposé par M. J. Carpentier (fig. 241).

Cet instrument est basé sur le principe suivant: pour aimanter une masse de fer, il faut dépenser une certaine quantité d'énergie; s'il n'y avait pas d'hystérésis, cette énergie se retrouverait entièrement à la désaimantation; mais, par suite de l'hystérésis, une partie de l'énergie est absorbée et se retrouve sous forme de chaleur. Il s'ensuit que la mesure de l'énergie dépensée, lorsqu'on fait passer le fer par un cycle magnétique déterminé, peut servir à la mesure de l'hystérésis. Lorsqu'une masse de fer est soumise à l'action d'une force magnétisante telle que l'induction passe alternativement d'une valeur positive à la même valeur négative, la dépense d'énergie causée par l'hystérésis est donnée, pour chaque cycle et par centimètre cube de fer, en fonction de l'induction maximum atteinte \mathcal{B} , par la formule de Steinmetz :

$$W = \eta \mathcal{B}^{1.6}$$

La connaissance du coefficient η suffit à caractériser le fer essayé et la détermination de l'hystérésis peut être ramenée à une seule mesure pour une grandeur connue de \mathcal{B} . Pour

FIG. 241. — Hystérésimètre Blondel-Carpentier.

comparer simplement des qualités de fer différentes, il suffit de faire les mesures avec une valeur constante de \mathcal{B} .

L'hystérésimètre Blondel-Carpentier permet d'effectuer la mesure d'une autre manière: si on place un cylindre de fer doux dans un champ magnétique, son axe étant perpendiculaire aux lignes de force et si on fait tourner le champ autour de l'axe, on voit le cylindre tourner. Grâce à l'hystérésis, l'aimantation persiste dans le cylindre, dans la direction où elle se trouvait tout d'abord. La résistance au déplacement des lignes de force peut être mesurée et elle donne ainsi un moyen de déterminer la valeur de l'hystérésis.

Dans l'hystérésimètre Blondel-Carpentier, l'échantillon de fer à essayer est mis sous forme d'anneaux plats qui sont placés sur un support en laiton s'adaptant sur un arbre vertical. Cet arbre repose à sa partie inférieure dans une crapaudine et sa partie supérieure pivote dans une chape fixée au milieu de la glace servant de couvercle à l'instrument. Cet ensemble est porté par la platine supérieure et forme un ensemble rigide, de sorte que les anneaux de fer peuvent tourner avec l'arbre, mais ils sont ramenés constamment à la même position par un ressort hélicoïdal. Pour éviter les oscillations gênantes pendant que l'on effectue une mesure, le tube qui porte la crapaudine et qui contient l'arbre et le ressort est rempli de valvoline épaisse dont la viscosité est suffisante pour amortir les oscillations.

La position du fer est indiquée par un index qui se fixe à frottement sur l'arbre, au-dessus du porte-objet. Un cercle divisé, solidaire de la glace, permet de repérer la position de l'index et, comme ce cercle tourne avec la glace, on peut placer le zéro de la graduation où cela est nécessaire.

Le champ magnétique est produit par un aimant en fer à cheval, à branches verticales, reposant sur une crapaudine et guidé, dans le haut, par trois galets qui appuient sur la circonference d'un disque solidement attaché à l'aimant. Cette disposition permet de faire coïncider rigoureusement l'axe de rotation de l'aimant avec l'axe géométrique des anneaux de fer et assure l'aimantation uniforme de ces derniers. Le pivot inférieur est surmonté d'un petit disque sur lequel vient appuyer un galet en cuir, commandé par un bouton moletté et une manivelle.

L'aimant a été choisi de manière à produire une induction maximum d'environ 10 000 gauss.

Pour effectuer un essai, on découpe l'échantillon de fer en forme d'anneaux de 55 mm de diamètre extérieur et de 38 mm de diamètre intérieur. On en superpose un nombre suffisant pour obtenir une épaisseur de 4 mm. Les disques ainsi obtenus, bien recuits, sont placés sur le support destiné à les recevoir où ils sont maintenus par des taquets ; le tout est ensuite monté sur l'arbre et une goupille rend la position du support invariable. On place ensuite l'index, puis la glace et l'instrument est alors prêt à fonctionner.

On fait ensuite tourner l'aimant à l'aide de la manivelle. Pendant cette rotation, la réaction due aux pertes hystériétiques exerce un couple sur les disques de fer dont l'ensemble tend à être entraîné dans le sens du mouvement. En tordant un ressort en boudin, on ramène les disques à leur position première et c'est la mesure de cette torsion qui fait connaître l'hystérésis relative des échantillons. L'aimantation changeant constamment de sens avec la position de l'aimant, on mesure ainsi l'*hystérésis tournante*, c'est-à-dire celle qui existe dans les induits de machines à courant continu. L'hystérésis ainsi mesurée est appelée tournante par opposition à l'hystérésis alternative à laquelle est soumise le noyau d'un transformateur.

Lorsque l'équilibre est obtenu, c'est-à-dire lorsque le couple de torsion du ressort fait équilibre au couple exercé par l'aimant, l'essai est terminé. En désignant par V le volume du fer essayé, par w le couple du ressort exprimé en ergs par radian, par θ le double de l'angle de déviation, c'est-à-dire la lecture faite sur le cercle divisé exprimée en radians, et par n le nombre de tours de l'aimant par seconde, on a :

$$W = \frac{\pi w}{V} \theta;$$

il suffit donc de multiplier la lecture par un coefficient numérique, déterminé une fois pour toutes, pour obtenir directement la perte en ergs par centimètre cube du fer essayé, à la valeur de 3 donnée par l'aimant.

L'étalonnage de cet instrument se fait généralement au moyen d'un échantillon étudié préalablement par la méthode balistique ; on peut aussi déterminer le couple du ressort par la méthode des oscillations.

Avec l'hystérésimètre Blondel-Carpentier, les qualités hystériétiques des fers peuvent être appréciées à 50/0 près ; or, les méthodes balistiques donnent rarement plus de précision et les opérations de mesure sont plus pénibles.

INSTRUMENTS DIVERS ET APPAREILS ACCESSOIRES POUR INSTALLATIONS DE MESURE ÉLECTRIQUE

INSTRUMENTS DIVERS

Parmi les instruments de mesure qui n'ont pu être classés dans les chapitres précédents, nous citerons les suivants :

Un appareil transportable combiné pour effectuer les essais des câbles (résistance, résistance d'isolement et capacité), exposé par M. Th. Edelmann, de Munich ;

Une installation complète pour les essais de câbles, comprenant galvanomètre, échelle, shunt, boîte de résistances, commutateur, clés, condensateur étalon, etc., exposée par MM. Hartmann et Braun, de Francfort, qui présentaient également une voiture complètement installée et aménagée pour effectuer les mêmes essais.

Instruments universels. — On désigne ainsi certains instruments portatifs disposés pour permettre d'effectuer des mesures de tension, d'intensité, de résistance, d'isolement, etc.

Galvanomètre universel Siemens et Halske. — Cet instrument (fig. 242) présente la même disposition que l'ancien galvanomètre universel Siemens bien connu, mais avec cette différence que le galvanomètre astatique a été remplacé par un galvanomètre Deprez-d'Arsonval à cadre mobile monté sur pivots ; le fil de la bobine mobile est roulé sur un cadre en cuivre rouge afin d'obtenir un amortissement atteignant presque l'apérioridité. Des spiraux en bronze phosphoreux amènent le courant au cadre mobile et servent à développer le couple résistant.

L'aiguille se meut au-dessus d'une glace, ce qui permet d'éviter les erreurs de parallaxe.

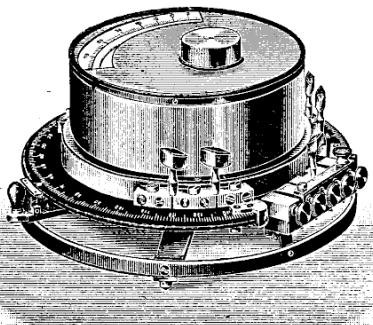
Fig. 242. — Galvanomètre universel Siemens et Halske.

Le cadre mobile a une résistance d'un

ohm exactement et la graduation, en 150 parties égales, donne aussi bien des millampères que des millivolts.

L'aimant permanent de ce galvanomètre est préparé de manière à conserver un moment magnétique bien constant.

La figure 243 montre le galvanomètre universel vu par-dessus. Le plateau en ébonite est muni, sur son pourtour, d'une gorge demi-circulaire dans laquelle est tendu un fil bien calibré,



qui occupe environ 300° de la circonférence du plateau. Les deux extrémités de ce fil aboutissent à deux butoirs.

Un bras, mobile autour du centre du plateau d'ébonite, se termine par un curseur, dont le contact en platine appuie sur le fil calibré. Le point de contact est repéré par la position d'un index solidaire du bras mobile, index se déplaçant devant une graduation tracée sur le bord du plateau.

Autour du galvanomètre se trouvent, de part et d'autre sur le devant, six plots aboutissant à des résistances de 1, 9, 90 et 900 ohms qui s'intercalent dans le circuit du galvanomètre en levant les chevilles correspondantes.

Deux autres plots, placés à la partie postérieure, peuvent être reliés par une cheville et servent à shunter le galvanomètre; enfin, cinq bornes, marquées I à V, permettent d'effectuer les connexions nécessaires entre l'instrument et les circuits extérieurs.

Les bornes II et V peuvent être mises en communication par une clé et les bornes III et IV peuvent être réunies directement par une cheville.

Le dessus du galvanomètre est formé d'une glace noire (fig. 243), sur laquelle sont tracés en blanc les divers schémas de montage correspondant aux différents usages de l'instrument. C'est une idée nouvelle et heureuse.

Des shunts ou des résistances additionnelles accompagnent le galvanomètre universel et peuvent se monter entre les bornes de l'instrument, afin d'en étendre les indications.

Pour l'usage, il est inutile d'orienter le galvanomètre suivant le champ terrestre, comme on était obligé de le faire autrefois lorsque ce galvanomètre était du système astatique. Il n'est pas non plus nécessaire de disposer l'ensemble sur vis calantes pour le placer bien horizontalement.

Les deux portions du fil calibré séparées par le contact à curseur déterminent le rapport des résistances des bras de proportion d'un pont de Wheatstone.

L'extrémité de droite du fil calibré est reliée au cadre mobile du galvanomètre et son extrémité de gauche aboutit à la borne III. La borne I est reliée à la manette du curseur et, par conséquent, au milieu des bras du pont.

La borne II est en communication avec le premier plot de la série des résistances, dont le dernier plot est relié à une des extrémités du cadre mobile du galvanomètre, tandis que la borne IV est reliée à l'extrémité opposée de ce cadre. Enfin, à la borne V, se fixe le conducteur d'un des pôles de la pile, dont l'autre pôle est mis à la terre; une clé met en relation, lorsqu'on l'abaisse, la borne V avec la borne II.

Caisse portative universelle Chauvin et Arnoux. — Cet instrument (fig. 244) constitue un laboratoire complet de mesure électrique ; il comprend :

- 1^o Un pont double de lord Kelvin pour la mesure des faibles résistances;
 - 2^o Un pont de Wheatstone avec boîte de résistances à décades;
 - 3^o Un shunt de galvanomètre;
 - 4^o Un galvanomètre Deprez-d'Arsonval;
 - 5^o Trois shunts pour les mesures d'intensité jusqu'à 300 ampères;
 - 6^o Une échelle graduée.

Sur le devant de la caisse se trouvent sept boutons : les deux extrêmes à gauche sont marqués OHMS ; les trois du milieu, AMPÈRES, et les deux extrêmes à droite, VOLTS. Ces boutons, par une simple pression, permettent d'effectuer toutes les connexions intérieures nécessaires pour les différentes mesures.

Des bornes, placées sur les bords de la plaque isolante servant de couvercle, reçoivent les divers conducteurs ; des inscriptions abrégées indiquent l'affectation de chacune de ces bornes.

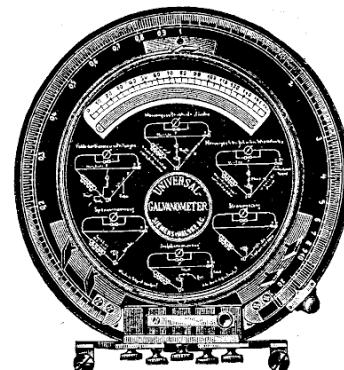


FIG. 243. — Galvanomètre universel Siemens et Halske. Vue de la face supérieure.

Le pont double de lord Kelvin est constitué par une tige de mallechort, placée au-dessus

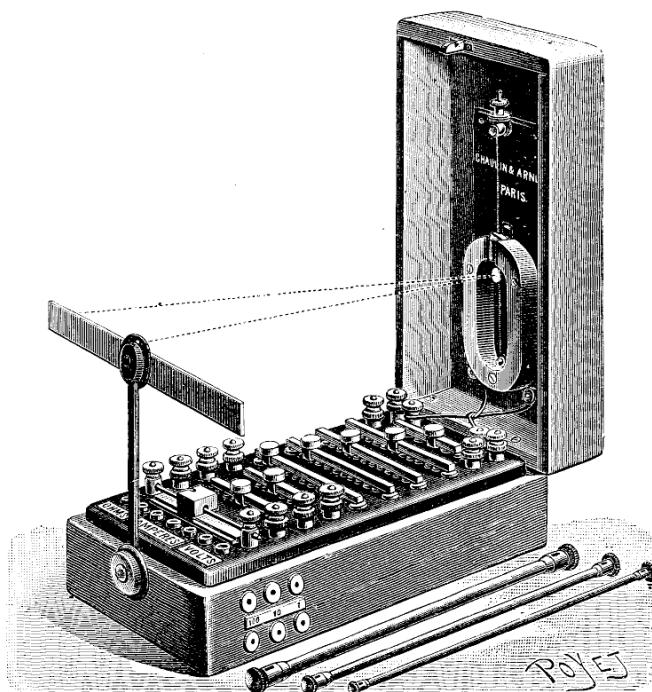


FIG. 244. — Caisse universelle de mesure Chauvin et Arnoux.

d'une règle graduée et munie d'un curseur, et par deux séries de résistances étalonnées marquées PONTS. Deux bornes r , x , permettent de relier la résistance à mesurer.

Le pont de Wheatstone comprend quatre séries de résistances ayant respectivement 1, 10, 100 et 1 000 ohms, ce qui donne une résistance totale de 9 999 ohms. La branche de proportion à résistance totale constante est divisée en résistances partielles, de telle manière que le simple déplacement d'un curseur donne les rapports 100, 10, 1, 1/10 et 1/100, permettant ainsi d'effectuer des mesures de résistances comprises entre 0,01 et 1 ohm et entre 100 et 9 999 ohms. Cette branche de proportion est celle des deux ponts qui se trouve la plus rapprochée des séries de résistances en décades. La résistance à mesurer est reliée aux bornes RX.

Pour mesurer des résistances d'isolement, on emploie la méthode des comparaisons successives. A cet effet, une résistance de 100 000 ohms est montée en circuit dans la caisse. La pile, dont la force électromotrice doit être comprise entre 20 et 200 volts, se relie aux bornes + FEM — et les bornes RA sont reliées à l'aide d'une barrette en cuivre. On met le curseur des shunts sur le plot convenable pour réduire la sensibilité du galvanomètre.

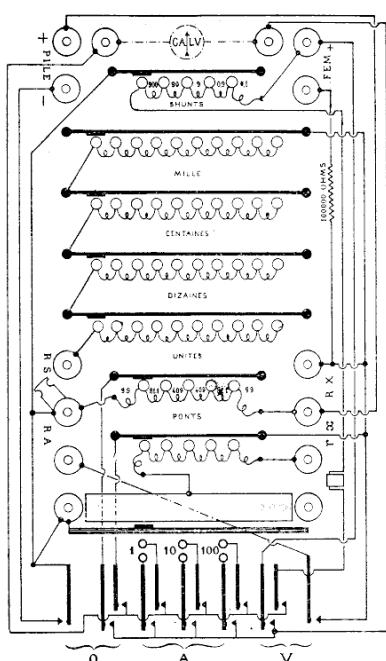


FIG. 245. — Schéma des connexions de la caisse universelle de mesure Chauvin et Arnoux.

mètre dans la proportion voulue; ce shunt permet de faire varier la sensibilité dans les rapports 1, 1/10, 1/100, 1/10³, 1/10⁴, et comporte cinq bobines en série ayant une résistance totale de 1 000 ohms et respectivement de 900; 90; 9; 0,9 et 0,1 ohm. Pour que ces shunts soient applicables à tous les galvanomètres, on leur adjoint, lors de la construction, une résistance de tarage.

Pour les mesures d'intensité de 0,000 0001 à 0,3 ampère, on utilise les shunts du galvanomètre; suivant le shunt employé, chaque division de l'échelle correspond à 0,001; 0,0001; 0,000 001; 0,000 0001 ou 0,000 00001 ampère. Lorsque les intensités sont supérieures à 0,3 ampère, on se sert de l'un des trois shunts séparés qui sont logés dans le couvercle de la caisse.

Enfin, pour les mesures de tension, on les détermine également par la déviation directe du galvanomètre et, suivant la position donnée au curseur du shunt, chaque division correspond à 0,01; 0,1 ou 1 volt.

La figure 245 donne le schéma des connexions de cet instrument universel.

APPAREILS ACCESSOIRES POUR INSTALLATIONS DE MESURE ÉLECTRIQUE

Piles étalons. —

Les éléments de pile étalon exposés étaient peu nombreux. L'Institut physico-technique Impérial de Charlottenbourg (Allemagne) avait exposé un élément étalon Latimer-Clark.

Cet élément (fig. 246) se compose d'un vase en verre placé dans une enveloppe métallique fermée par un couvercle en ébonite. Sur celui-ci sont fixées les bornes entre lesquelles se trouve la tige d'un thermomètre. L'électrode de platine amalgamé qui forme le pôle positif communique à une des bornes par un fil de platine scellé dans un tube de verre. Elle plonge dans une pâte de sulfate de mercure, de sulfate de zinc et de mercure contenue dans un vase poreux.

Une tige de zinc pur plonge dans des cristaux de sulfate de zinc recouverts par une solution saturée de ce produit. Le zinc est protégé par un tube de verre dans son passage au travers du liquide et ce dernier est recouvert de paraffine, puis de liège râpé et, enfin, de résine fondue. Cette disposition permet d'éliminer toute trace d'air et de permettre cependant, grâce au liège, à la dilatation de se produire.

Le principal avantage de ce montage est de rendre l'élément transportable sans que les secousses puissent faire varier sa force électromotrice. Puisque celle-ci est admise *a priori*, comme étant égale à 1,434 volt, on comprend combien il est important qu'on puisse compter sur cette valeur qui sert de point de départ pour toutes les mesures faites avec les potentiomètres.

L'Institut physico-technique avait également exposé un élément étalon Weston, aux sulfates de cadmium et de mercure, qui a, sur l'élément Latimer-Clark, l'avantage d'avoir une force électromotrice indépendante des variations ordinaires de la température. Cet élément a été particulièrement étudié par l'Institut de Charlottenbourg.

M. J. Carpentier avait exposé des éléments étalons Latimer-Clark, Gouy et Weston. A signaler également l'élément étalon Latimer-Clark construit par MM. Chauvin et Arnoux.

MM. Hartmann et Braun avaient également, dans leur exposition, des éléments étalons Latimer-Clark, Weston et lord Raleigh.

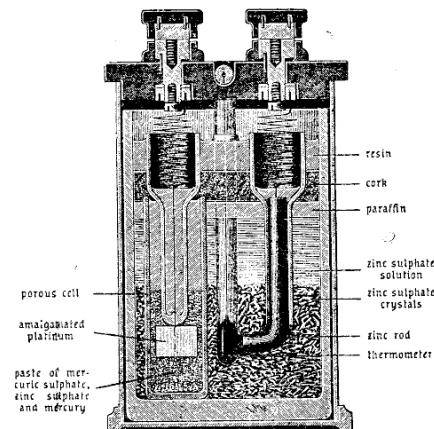


FIG. 246. — Pile étalon Latimer-Clark, modèle de l'Institut de Charlottenbourg.

Enfin, dans la section anglaise, M. James White et MM. Crompton et C^{ie} avaient envoyé quelques éléments étalons.

Condensateurs étalons. — Très peu de modèles de condensateurs figuraient à l'Exposition.

M. J. Carpentier exposait des condensateurs ordinaires à papier, des condensateurs de précision à mica et, enfin, des condensateurs avec mica argenté, l'argenture constituant les armatures, de sorte qu'il n'y a aucun corps étranger interposé; ce mode de construction évite les variations de capacité causées par le desserrage, le contact de l'armature avec le diélectrique étant assuré par construction.

MM. Keiser et Schmidt, de Berlin, avaient exposé des condensateurs dans lesquels le diélectrique est du papier chimiquement pur imprégné d'une matière isolante spéciale dont la composition n'a pas été communiquée. La charge résiduelle de ces condensateurs serait, paraît-il, presque aussi faible que celle des condensateurs à mica.

La Société Siemens et Halske, de Berlin, avait des condensateurs à mica et des condensateurs à papier.

Étalons de self-induction. — Deux constructeurs seulement avaient exposé des étalons de self-induction, M. J. Carpentier et la Société Ganz, de Budapest.

M. J. Carpentier avait exposé un étalon de self-induction de 1 henry ayant une constante de temps d'environ 0,01 seconde et des étalons de 0,1 henry.

L'étalon exposé par la Société Ganz est l'œuvre des professeurs Hoor et Fröhlich; c'est un travail de haute précision. Il se compose d'un tore en marbre à section rectangulaire, très exactement travaillé de manière à obtenir des dimensions géométriques parfaitement définies. Le bobinage se compose de deux fils de cuivre isolés à la soie et roulés très uniformément autour du tore en marbre. Les extrémités des deux bobines aboutissent à quatre bornes disposées sur le socle en ébonite. Le coefficient de self-induction se calcule en partant des dimensions géométriques et du nombre de spires. Quand les deux enroulements sont montés en série, on obtient un étalon dont le coefficient est de $0,0998 \cdot 10^{-9}$ henry. Cet étalon se renferme dans une boîte en chêne fermée par une glace.

Clés diverses. — Les clés de divers modèles exposées par MM. J. Carpentier, E. Ducretet, Hartmann et Braun, James White et la Société Siemens et Halske ne présentaient aucune disposition nouvelle. Toutefois, il faut constater le fini de leur exécution et les ingénieuses dispositions prises pour éviter les pertes de charge par les supports isolants des pièces métalliques. Dans ce but, certains constructeurs donnent aux colonnes d'ébonite une surface cannelée avec arêtes vives.

L'ébonite étant hygrométrique et s'altérant avec le temps, on a cherché à la remplacer par d'autres substances, mais sans grand succès, car le beau poli de l'ébonite ne s'obtient pas avec les substances essayées jusqu'ici.

Suspensions pour galvanomètres. — Des modèles de suspension antisécousses, du type Julius, étaient exposés par M. J. Carpentier et par MM. Hartmann et Braun.

L'appareil Julius, que représente la figure 247, permet de neutraliser complètement l'effet des vibrations étrangères sur les équipages mobiles des galvanomètres sensibles, tels que celui de lord Kelvin.

L'instrument qu'on veut soustraire aux trépidations est disposé sur un plan suspendu par trois points A', B', C', disposés en triangle équilatéral, à trois autres points A, B, C d'un support ou du plafond, également disposés en triangle équilatéral. On emploie pour la suspension trois longs fils métalliques.

D'après les études du professeur Julius, les forces qui agissent en A', B', C' produisent une perturbation beaucoup plus faible que celles qui agissent sur les points A, B, C. Pour réduire au

minimum l'effet perturbateur, il est nécessaire que le centre de gravité du système (galvanomètre et support) coïncide avec celui des points A', B', C'. Enfin, les trois longs fils de suspension doivent être aussi identiques que possible et être également tendus. Dans ces conditions, c'est le centre de gravité du système qui subit les moindres perturbations, les autres points étant d'autant plus influencés qu'ils sont plus éloignés de ce centre de gravité.

Comme c'est l'équipage mobile qui doit être le mieux protégé contre les influences extérieures, on s'arrange pour que le point d'attache supérieur de la fibre de quartz ou du fil de cocon qui supporte le miroir soit au centre de gravité du système. Pour obtenir ce résultat, le support est pourvu de masses supplémentaires que l'on peut déplacer à volonté pour faire varier la position du centre de gravité qui doit coïncider avec le point de suspension du miroir et le milieu du triangle ABC.

L'appareil est constitué par trois tiges verticales S, S, S, solidement reliées par les anneaux R₁, R₂; un second anneau T, dont la hauteur peut être réglée, sert à supporter le galvanomètre que l'on fixe à l'aide de pinces spéciales. Les trois crochets H, H, H servent à suspendre l'ensemble par les fils métalliques fixés, d'autre part, au plafond; ces crochets représentent les tâter. Les trois masses G, G, G servent à déplacer le centre de gravité; elles sont enfilées sur les tiges S, S, S, qui sont graduées de façon que les masses puissent être relevées ou abaissées de quantités égales. Enfin, les trois ailettes D, D, D plongent dans des godets pleins d'huile et constituent un amortisseur. Les godets sont placés sur un support spécial qui est indépendant du système et n'est pas représenté sur la figure.

Les fils de suspension doivent avoir une longueur de 2 à 3 mètres.

Pour installer un galvanomètre, on place l'appareil sur une table et l'on décroche les fils de suspension. Puis on fixe le galvanomètre sur l'anneau T, que l'on élève ou que l'on abaisse jusqu'à ce que le miroir de l'équipage mobile se trouve à la hauteur du plan horizontal HHH. On met l'ensemble de niveau en manœuvrant les vis calantes de l'anneau R₂ et, au besoin, celles du galvanomètre lui-même. Enfin, on règle la position des masses G, G, G. On accroche alors les trois fils de suspension en H, H, H, et on retire la table. Si l'horizontalité du système ne s'est pas maintenue, il suffit d'allonger ou de raccourcir deux des fils à leur point d'attache au plafond en agissant sur des vis de rappel disposées à cet effet.

Échelles. — M. J. Carpentier exposait plusieurs modèles de ses échelles transparentes avec lanterne pour bougie et avec lanterne pour lampe à incandescence.

Les échelles transparentes de M. E. Ducretet sont disposées pour recevoir, à leur partie supérieure, une lanterne à gaz ou une lanterne avec lampe à incandescence.

La Société Siemens et Halske avait exposé un support mural pour galvanomètre et échelle, consistant en une planchette verticale que l'on accroche au mur et qui est munie d'une console sur laquelle se place le galvanomètre. L'échelle, disposée au-dessous du galvanomètre et au-dessus de la caisse renfermant la lampe, est facilement accessible. Un système de glaces et de prismes à réflexion totale envoie la lumière de la lampe sur le miroir du galvanomètre, qui la réfléchit sur l'échelle, dont l'inclinaison se règle à volonté.

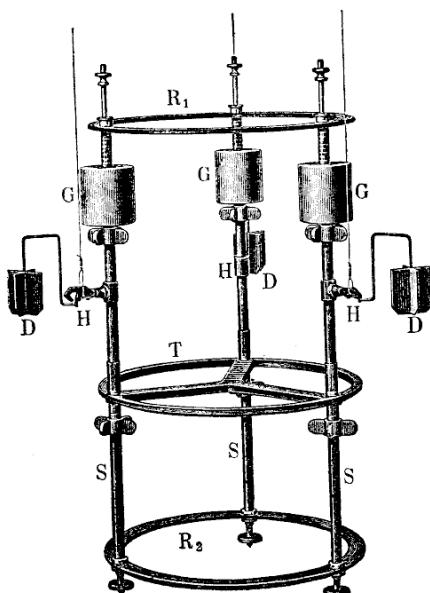


FIG. 247. — Suspension antiseources, système Julius.

points A', B', C', disposés en triangle équilatéral. Les trois masses G, G, G servent à déplacer le centre de gravité; elles sont enfilées sur les tiges S, S, S, qui sont graduées de façon que les masses puissent être relevées ou abaissées de quantités égales. Enfin, les trois ailettes D, D, D plongent dans des godets pleins d'huile et constituent un amortisseur. Les godets sont placés sur un support spécial qui est indépendant du système et n'est pas représenté sur la figure.

Les échelles transparentes de M. J. Carpentier exposait plusieurs modèles de ses échelles transparentes avec lanterne pour bougie et avec lanterne pour lampe à incandescence.

Les échelles transparentes de M. E. Ducretet sont disposées pour recevoir, à leur partie supérieure, une lanterne à gaz ou une lanterne avec lampe à incandescence.

La Société Siemens et Halske avait exposé un support mural pour galvanomètre et échelle, consistant en une planchette verticale que l'on accroche au mur et qui est munie d'une console sur laquelle se place le galvanomètre. L'échelle, disposée au-dessous du galvanomètre et au-dessus de la caisse renfermant la lampe, est facilement accessible. Un système de glaces et de prismes à réflexion totale envoie la lumière de la lampe sur le miroir du galvanomètre, qui la réfléchit sur l'échelle, dont l'inclinaison se règle à volonté.

M. Olivetti, d'Ivrea (Italie), exposait deux modèles d'échelles transparentes avec lampe à incandescence.

MM. Hartmann et Braun avaient aussi dans leur exposition, indépendamment des échelles ordinaires, plusieurs modèles de supports de lunette mobiles sur chariot se fixant au mur ou au plafond; ces supports, déplaçables en tous sens, ont un mouvement micrométrique ou à main, à volonté; l'éclairage de l'échelle est assuré par une lampe à incandescence avec réflecteur.

Enfin, des modèles d'échelles étaient également exposés par MM. James White, de Glasgow, Crompton et C^{ie}, de Londres, et Th. Edelmann, de Munich.

Installation type de laboratoire de mesure électrique. — M. J. Carpentier avait exposé une installation de laboratoire de mesure semblable à celle qui est réalisée dans son laboratoire d'étalonnement.

Cette installation comprend la table de l'opérateur, *sur laquelle aucun appareil n'est fixe, sauf, dans certains cas, les échelles transparentes.*

Des barres de cuivre, superposées horizontalement dans un plan vertical, règnent tout le long de la table et, au moyen de prises de contact à serrage rapide, servent à établir les connexions nécessaires entre les divers appareils, ainsi qu'à amener le courant provenant de batteries de piles ou d'accumulateurs.

Les galvanomètres sont placés à 1 m en avant de la table sur des supports indépendants en forme de trépied. Les fils de liaison des galvanomètres à la table sont fixés sous moulures en contournant le plancher de manière à éviter les fils volants et à permettre le passage entre la table et les galvanomètres.

TABLE DES MATIÈRES

I

Galvanomètres

GALVANOMÈTRES À AIMANT MOBILE ET À BOBINE FIXE

Galvanomètres lord Kelvin :	
Modèles Ducrelet.....	1
Modèles J. Carpentier.....	2
Modèle Keyser et Schmidt.....	4
Modèle J. White.....	4
Galvanomètre astatique Broca.....	4
Galvanomètre astatique Hartmann et Braun.....	5
Galvanomètre astatique et apériodique à lunette Hartmann et Braun.....	6
Galvanomètre astatique Siemens et Halske.....	7
Galvanomètres cuirassés du Bois-Rubens.....	8
Microgalvanomètre astatique Rosenthal.....	9
Galvanomètres Wiedemann :	
Modèle E. Ducretet.....	10
Modèle Hartmann et Braun.....	11
Modèle Edelmann.....	11

GALVANOMÈTRES À AIMANT FIXE ET À BOBINE MOBILE

Galvanomètres Deprez-d'Arsonval :	
Modèles J. Carpentier.....	12
Modèles E. Ducretet.....	14
Modèles Edelmann.....	15
Modèle Hartmann et Braun.....	16
Modèle Siemens et Halske.....	17
Modèle bifilaire Crompton et C°.....	17
Modèles Chauvin et Arnoux.....	18
Galvanomètre enregistreur à relais Callendar.....	19

GALVANOMÈTRE THERMIQUE

Galvanomètre à miroir Hartmann et Braun.....	22
--	----

GALVANOMÈTRE ÉLECTRO-CAPILLAIRE

Galvanomètre Lippmann.....	23
----------------------------	----

II

Électrodynamomètres

ÉLECTRODYNAMOMÈTRES DE TORSION

Electrodynamomètres Siemens et Halske.....	25
Electrodynamomètre Ganz.....	27
Electrodynamomètre J. Carpentier	27
Electrodynamomètre Hartmann et Braun.....	27

ÉLECTRODYNAMOMÈTRES-BALANCES

Ampère-étalon Pellat.....	28
Electrodynamomètres-balances lord Kelvin.....	29

III

Électromètres

ÉLECTROMÈTRE ABSOLU

Electromètre Bichat et Blondlot.....	34
ÉLECTROMÈTRES A GRADUATION EMPIRIQUE	
Electromètre portatif lord Kelvin.....	35
Electromètres Mascart.....	35
Electromètre astastique Blondlot et Curie.....	36
Electromètre apériodique J. Carpentier.....	37
Electromètre Halwachs.....	38
Electromètre Nernst et Dolezalek.....	38
Electromètre Bornhauser.....	38
Electromètre Hoor.....	38

IV

Ampèremètres et voltmètres

INSTRUMENTS ÉLECTRODYNAMIQUES

Ampèremètre et voltmètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.....	39
Voltmètre du laboratoire Volta.....	41

INSTRUMENTS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Instruments à bobine et à aimant fixes avec fer doux mobile :	
Ampèremètre et voltmètre Deprez-Carpentier.....	41
Voltmètre J. Richard.....	42
Voltmètre Th. Horn.....	43
Instruments à bobine fixe et à fer doux mobile :	
Ampèremètre et voltmètre Javaux.....	43
Ampèremètres et voltmètres Chauvin et Arnoux.....	44
Ampèremètre pour courants alternatifs du laboratoire Volta.....	44
Ampèremètre et voltmètre de la Compagnie générale d'Électricité de Creil.....	45
Ampèremètres et voltmètres J. Richard.....	45
Voltmètre Hartmann et Braun.....	46
Ampèremètre Hartmann et Braun.....	47
Ampèremètre et voltmètre Siemens et Halske.....	47
Voltmètre Horn.....	48
Voltmètre Breguet.....	48
Ampèremètre Breguet.....	49
Ampèremètre lord Kelvin.....	49
Instruments à bobine mobile et à aimant fixe :	
Voltmètre Carpentier.....	50
Voltmètre Weston.....	51
Ampèremètres et voltmètres Chauvin et Arnoux.....	51
Ampèremètre et voltmètre de la Compagnie générale d'électricité de Creil.....	56
Ampèremètre et voltmètre du laboratoire Volta.....	56
Ampèremètre et voltmètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.....	57
Ampèremètre et voltmètre Hartmann et Braun.....	58
Ampèremètres et voltmètres Siemens et Halske.....	59
Voltmètres de précision lord Kelvin.....	59
Ampèremètre et voltmètre Caron.....	60
Instruments de divers constructeurs.....	61

INSTRUMENTS A INDUCTION

Ampèremètre et voltmètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.....	61
Ampèremètre et voltmètre Ferraris.....	64

INSTRUMENTS THERMIQUES

Ampèremètres et voltmètres Hartmann et Braun.....	64
Ampèremètre et voltmètre Chauvin et Arnoux.....	66

TABLE DES MATIÈRES

13-139

Voltmètres J. Richard.....	67
Ampèremètre et voltmètre Olivetti.....	69

VOLTMÈTRES ÉLECTROSTATIQUES

Voltmètre J. Carpentier.....	71
Voltmètre Chauvin et Arnoux.....	71
Voltmètre lord Kelvin.....	72
Voltmètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.....	73
Voltmètre Hartmann et Braun.....	73
Voltmètre multicellulaire lord Kelvin.....	74
Voltmètre multicellulaire Hartmann et Braun.....	74
Voltmètre Riccardo Arno.....	74

V

Résistances et instruments pour la mesure des résistances

RÉSISTANCES

Résistances étalons.....	77
Résistances étalonnées.....	80

BOITES DE RÉSISTANCES ET PONTS

Boites de résistances.....	81
Ponts de Wheatstone.....	86
Ponts doubles lord Kelvin.....	86
Pont de Wheatstone-Kirchhoff.....	89
Pont-téléphone de Nippoldt.....	89
Pont de Kohlrausch.....	90

OHMMÈTRES

Ohmmètres J. Carpentier.....	91
Ohmmètre portatif Chauvin et Arnoux.....	92
Ohmmètre Hartmann et Braun.....	94
Ohmmètre de l'American Electric Specialty Company	96

VI

Potentiomètres

Potentiomètre J. Carpentier.....	96
Potentiomètre Chauvin et Arnoux.....	99
Potentiomètre Carrenza.....	101
Potentiomètre Hartmann et Braun.....	103
Potentiomètre Keyser et Schmidt.....	104
Potentiomètre Otto Wolff.....	105
Potentiomètre Siemens et Halske.....	108
Potentiomètre Crompton.....	109

VII

Wattmètres

WATTMÈTRE ÉLECTROSTATIQUE

Wattmètre Blondlot et Curie.....	112
----------------------------------	-----

WATTMÈTRES ÉLECTRODYNAMIQUES

Wattmètre J. Carpentier à torsion, modèle portatif.....	113
Wattmètre du laboratoire Volta.....	114
Wattmètre enregistreur J. Richard.....	115
Wattmètre universel Blondel-Labour.....	116
Wattmètre Hartmann et Braun à lecture directe.....	118
Wattmètres de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.....	119

Wattmètre Siemens et Halske.....	121
Wattmètre lord Kelvin.....	122
Wattmètres Ganz.....	123

WATTMÈTRES D'INDUCTION

Wattmètres de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.....	124
Wattmètre Ferraris.....	124

V

Instruments de mesure spéciaux pour les courants alternatifs

PHASEMÈTRES

Phasemètre Siemens et Halske.....	126
Phasemètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.....	127
Phasemètre Hartmann et Braun	128
Phasemètre des tangentes Riccardo Arno.....	128

FRÉQUENCEMÈTRES

Fréquencemètre à diapason Stockardt.	130
Fréquencemètre R. Kempf.....	130
Fréquencemètre Hartmann et Braun.....	131
Fréquencemètre R. Arno.....	131

OSCILLOGRAPHES ET RHÉOGRAPHES

Oscillographe Duddell .. .	132
Rhéographe Abraham.....	133
Enregistreur de courbes pour courants alternatifs.....	136
Appareil du professeur Boor pour relever les courbes de courants alternatifs	137

IX

Instruments de mesures magnétiques

PERMÉAMÉTRES

Perméamètre d'induction Hopkinson.....	138
Perméamètre à arrachement J. Carpentier.....	139
Perméamètre de torsion, modèle J. Carpentier.....	140
Balance magnétique du Bois.....	142
Perméamètre du Dr Hubert Kath.....	143
Perméamètre à spirale de bismuth.....	145

HYSTÉRÉSIMÈTRE

Hystérésimètre Blondel-Carpentier.....	148
--	-----

X

Instruments divers et appareils accessoires pour installations de mesure électrique

INSTRUMENTS DIVERS

Instruments universels :	
Galvanomètre universel Siemens et Halske.....	150
Caisse portative universelle Chauvin et Arnoux.....	151

APPAREILS ACCESSOIRES POUR INSTALLATIONS DE MESURE ÉLECTRIQUE

Piles étalons.....	153
Condensateurs étalons.....	154
Étalons de self-induction.....	154
Cles diverses.....	154
Suspensions pour galvanomètres.....	154
Echelles.....	155
Installation type de laboratoire de mesure électrique.....	156

Tours. — Imprimerie DESLIS FRÈRES, rue Gambetta, 6.