

Réalisation d'un galvanomètre à aimants mobiles astatisé par un procédé nouveau

Autor(en): **Meylan, Léon**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Helvetica Physica Acta**

Band (Jahr): **5 (1932)**

Heft IV

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-110171>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Réalisation d'un galvanomètre à aimants mobiles astatisé par un procédé nouveau¹⁾

par Léon Meylan

(3. VIII. 32.)

Sommaire. — Les modèles anciens de galvanomètres à aimants mobiles astatiques ne sont plus utilisables aujourd'hui à cause de l'instabilité de leur zéro. La réadaptation de ce type de galvanomètre aux conditions des laboratoires modernes a été tentée en utilisant un procédé nouveau d'astatisation et en multipliant le nombre des étages d'aimants.

Les résultats obtenus peuvent être considérés comme entièrement satisfaisants. Deux instruments sont décrits, l'un spécialement sensible au courant, l'autre spécialement sensible à la tension. La sensibilité du premier est de 2.6×10^{-11} ampères pour une déviation de 1 mm. à 1 m., la période totale étant de 10 secondes et la résistance de 1960 Ω . La sensibilité du deuxième est de 6×10^{-10} volts, pour la même déviation et la même période, la résistance étant de 0.5 Ω . Ces sensibilités pourraient être facilement dépassées. La stabilité du zéro de ces instruments est telle que la variation moyenne de zéro atteint seulement 0.1 mm. à 1 m. pour une période de 8 secondes.

Différents avantages de ces galvanomètres sont signalés: amortissement variable, sensibilités et résistances multiples, facilité de réglage, etc.

Il a été fait une étude de la variation de l'intensité d'aimantation d'un disque d'acier de diamètre constant, en fonction de l'épaisseur. Des courbes inattendues ont été obtenues.

Enfin, la relation existant entre la grandeur du miroir d'un galvanomètre et la précision de la lecture du spot a été étudiée systématiquement.

Introduction.

Il était intéressant de tenter la réadaptation du galvanomètre à aimants mobiles aux conditions de la technique moderne, autrement dit, de réaliser un galvanomètre à aimants mobiles dont le zéro soit stable, même pour les grandes sensibilités, et malgré les perturbations continuelles apportées au champ terrestre dans tout laboratoire.

Nous avons atteint ce résultat au moyen d'un procédé nouveau d'astatisation et en utilisant un équipage pourvu de quatre étages d'aimants au lieu des deux étages habituels des galvanomètres astatiques du type Thomson.

¹⁾ Extrait d'une thèse présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de Lausanne.

Des recherches analogues ont été tentées par NERNST et JAEGER¹⁾. Elles n'ont toutefois pas donné les résultats que l'on en espérait.

Les conditions théoriques auxquelles doit satisfaire un galvanomètre à aimants mobiles pour atteindre au maximum de sensibilité sont suffisamment connues pour qu'il soit inutile d'y revenir ici²⁾.

Il nous suffira également de signaler que des études expérimentales très complètes ont été faites en vue d'augmenter la sensibilité du galvanomètre. Ces études ont porté aussi bien sur l'équipage que sur les bobines³⁾.

I.

1. Astatisation. Principe.

Les galvanomètres à aimants mobiles ordinaires, type Thomson, dits astatiques, ne peuvent être complètement soustraits à l'influence des champs extérieurs pour plusieurs raisons.

Premièrement, ils ne possèdent, à part une exception⁴⁾, que deux groupes d'aimants. Il en résulte que, même si les deux groupes sont identiques et exactement opposés, l'équipage n'est astatique que pour des champs uniformes; or les champs extérieurs, tels qu'on les trouve dans un laboratoire (nous les engloberons pour simplifier dans le terme, impropre dans ce cas mais commode, de « champ terrestre »), ne sont pas uniformes.

Secondement, il est impossible de construire un équipage mobile avec une précision suffisante pour que les axes magnétiques des deux groupes d'aimants soient dans un même plan. Si les axes magnétiques sont dans des plans différents, l'équipage n'est pas astatique, même si les groupes sont identiques et les champs extérieurs uniformes.

¹⁾ E. HASCHÉ: Versuche mit einem neuen hochempfindlichen, störungsfreien Nadelgalvanometer. Dissertation, Berlin, 1927.

²⁾ Voir notamment: MAXWELL: Lehrbuch d. El. und d. Magn., vol. II, § 718 et 719, 1883. ABBOTT: Astrophys. Journ. 1903, p. 1—20.

³⁾ F. PASCHEN: Astatisches Thomsonsches Spiegelgalvanometer von hoher Empfindlichkeit. Zs. für Instrumentenkunde, 1893, p. 13.

MENDENHALL and WAIDNER: Construction of a sensitive galvanometer. Annals of the astrophysical observatory of the Smithsonian Institution, I, p. 244, 1900.

F. PASCHEN: Laboratoriumsgalvanometer. Phys. Zs. **14**, 1913, p. 521—24.

W. W. COBLENTZ: Sensitivity and magnetic Shielding tests of a Thomson Galvanometer for use in radiometry. Scientific papers of the Bureau of Standards, **282**, 1916, p. 423—446.

⁴⁾ ABBOTT, op. cit.

Enfin, il est extrêmement difficile de réaliser des groupes d'aimants possédant des moments magnétiques égaux.

Si l'on veut rendre le galvanomètre pratiquement astatique pour un champ non uniforme, il faut réaliser deux conditions.

1^o Rendre le galvanomètre astatique pour un champ uniforme.

2^o La condition 1^o étant remplie, faire en sorte que l'astatisation soit pratiquement conservée pour un champ non uniforme. On peut arriver à ce résultat en multipliant le nombre des groupes d'aimants de l'équipage et en les disposant judicieusement.

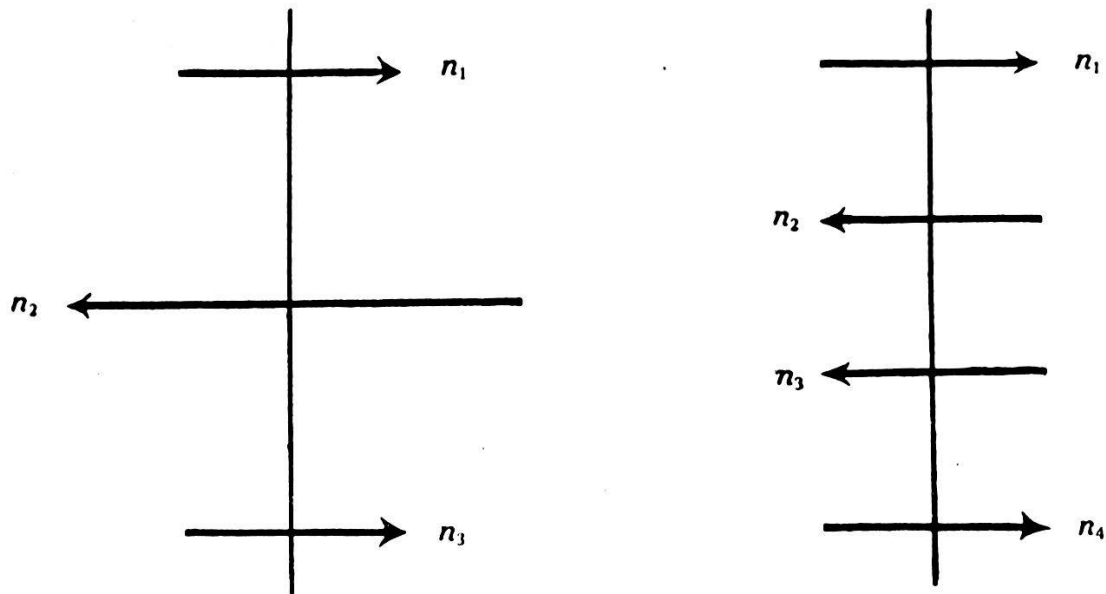


Fig. 1.

1. L'axe magnétique du groupe n_2 est de sens opposé aux axes de n_1 et n_3 . Les moments magnétiques de n_1 et n_3 sont égaux à la moitié de celui de n_2 . Les groupes sont équidistants. 2. Les axes magnétiques de n_2 et n_3 sont opposés à ceux de n_1 et n_4 . Les groupes sont équidistants et leurs moments magnétiques égaux.

Nous allons examiner la condition 2^o, en supposant momentanément la condition 1^o remplie.

On voit immédiatement qu'un équipage possédant trois ou quatre groupes d'aimants disposés suivant les schémas 1 et 2 de la fig. 1 est astatique pour les champs uniformes et pour les champs variant linéairement le long de l'axe. Si donc la distance entre les groupes extrêmes est suffisamment petite pour que, sur cette distance, les champs extérieurs varient linéairement, en première approximation, le galvanomètre est pratiquement astatique.

Nous donnerons plus loin les résultats de la comparaison entre un galvanomètre à deux et un galvanomètre à quatre

groupes d'aimants. On verra qu'effectivement le second est pratiquement astatique.

Nous avons préféré mettre quatre plutôt que trois groupes. Pour qu'un réglage de galvanomètre à aimants mobiles soit durable, il est essentiel que les aimants se stabilisent identiquement. Il faut donc qu'ils soient semblables et placés dans des conditions identiques. Cette condition est réalisée quand l'équipage possède quatre groupes, elle ne l'est pas s'il n'y a que trois groupes, car le groupe central possède un moment magnétique double de celui des groupes extrêmes.

Les perturbations du zéro dues à la non uniformité du « champ terrestre » étant éliminées, par l'emploi des quatre groupes, il reste à rendre l'équipage astatique pour un champ uniforme, en corrigeant les défauts de construction mentionnés plus haut.

Supposons le galvanomètre placé dans un champ uniforme.

On peut assimiler les moments magnétiques des groupes d'aimants à des vecteurs, dont la direction et le sens sont ceux des axes magnétiques des groupes et les intensités données par la valeur usuelle des moments magnétiques.

Les axes magnétiques des groupes sont généralement dans des plans différents et les moments magnétiques (usuels) ne sont pas rigoureusement égaux.

Le vecteur résultant des moments magnétiques aura par conséquent trois composantes; l'une, dans la direction de l'axe mobile par exemple, les deux autres étant dans un plan perpendiculaire à cet axe. La deuxième composante est dirigée suivant la direction moyenne des aimants et la troisième est perpendiculaire à cette direction.

L'équipage ne peut être astatique que si les deuxième et troisième composantes sont nulles. La première composante n'intervient pas.

Comme il est impossible, par construction, de réaliser cette condition, il faut, après coup, annuler ou « compenser » les deuxième et troisième composantes.

Il y a plusieurs solutions possibles. Nous avons adopté la suivante:

Un petit disque d'acier, non aimanté, foré centralement, est glissé sur l'axe mobile. Il est fixé perpendiculairement à cet axe. L'équipage du galvanomètre oscillant librement, on peut, au moyen de bobines spéciales faisant partie du galvanomètre, aimanter le disque dans deux directions perpendiculaires et annuler ainsi successivement les deux composantes du moment magnétique de l'équipage.

Pour que ce procédé d'astatisation fut applicable il fallait:

1^o Voir dans quelle mesure deux aimantations perpendiculaires successives s'ajoutent géométriquement.

2^o Que l'aimantation du disque soit suffisamment stable pour que le galvanomètre ne se dérègle pas rapidement.

Les essais faits ont montré que, si les aimantations sont égales à quelques % seulement de l'aimantation à saturation, elles s'additionnent à peu près géométriquement; assez imparfaitement toutefois pour que des tâtonnements soient à prévoir dans l'astatisation.

L'expérience a montré également que les variations de l'aimantation du disque, en fonction du temps, sont négligeables.

C'est compréhensible, si l'on songe que le moment magnétique du disque n'atteint, si l'équipage est bien construit, que le 1% du moment magnétique d'un des groupes.

Les deux grands avantages de ce nouveau mode d'astatisation, avantages que les procédés anciens ne possèdent pas, sont les suivants:

1^o La préparation et la fixation d'un disque sont assez simples pour être réalisables avec les équipages les plus légers. On peut donc construire un galvanomètre rigoureusement astatique aussi sensible qu'un galvanomètre non astatique ou imparfaitement astatique.

2^o On procède à l'astatisation, le galvanomètre étant achevé, l'équipage étant suspendu et non bloqué, sans toucher à celui-ci. On évite ainsi tout risque de déformation de l'équipage.

II.

2. Description de l'instrument.

L'axe de l'équipage est un tube d'aluminium de 84.5 mm. de longueur, 1.0 mm. de diamètre et 0.1 mm. d'épaisseur de paroi.

Les différentes parties de l'équipage sont disposées suivant le schéma suivant (fig. 2).

s et i sont les extrémités supérieure et inférieure de l'axe. En f , un fil d'acier de 6 mm. de longueur et 0.1 mm. de diamètre traverse perpendiculairement le tube de part en part et oscille entre deux fourches fixées au bâti de l'appareil. Ce fil empêche les rotations complètes de l'équipage.

Le miroir, fixé en m , a 3 mm. de haut et 4 mm. de largeur. C'est un fragment argenté de couvre-objet de microscope¹⁾.

¹⁾ Voir page 293: Grandeur à donner au miroir d'un galvanomètre.

En *c*, se trouve le disque de compensation. Ce disque, en acier cobalt-chrom ($Hc = 230$ gauss) a 2.5 mm. de diamètre et 0.08 mm. d'épaisseur. Un trou central de 1.0 mm. de diamètre permet le passage de l'axe. Deux anneaux d'aluminium placés, l'un au dessus, l'autre au dessous du disque, maintiennent celui-ci perpendiculaire au tube.

Nous avons remplacé chacun des groupes de petites aiguilles aimantées que l'on utilise habituellement dans les galvanomètres

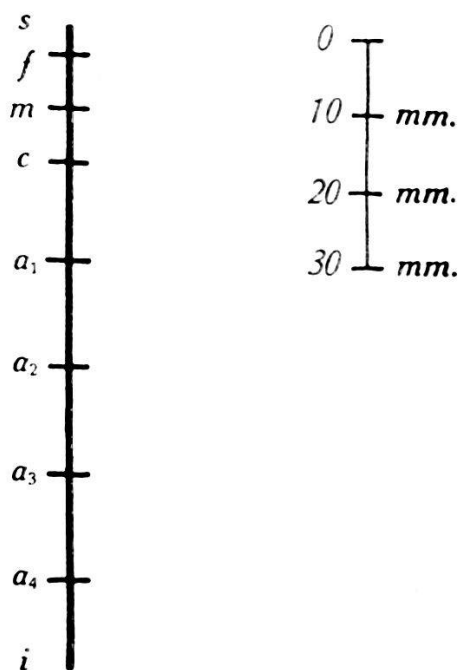


Fig. 2.

à aimants mobiles, par un seul aimant en forme de plaque mince¹⁾. Les quatre groupes d'aimants se présentent donc sous forme de quatre disques d'acier de 4 mm. de diamètre et 0.08 mm. d'épaisseur. Nous avons utilisé un acier « cobalt-chrom » à 36% de cobalt fourni par la maison Darwin de Sheffield. Les caractéristiques de cet excellent acier pour aimants sont:

$$\begin{aligned} Br &= 9000 \text{ gauss,} \\ Hc &= 230 \text{ gauss.} \end{aligned}$$

L'intensité d'aimantation I des aimants est, en moyenne, pour 4 mm. de diamètre et 0.08 mm. d'épaisseur (après stabilisation)

$$I = 450 \text{ c.g.s.}$$

et le moment magnétique

$$M = 0.455 \text{ c.g.s.}$$

¹⁾ Voir à ce sujet, page 291: Variation de l'aimantation d'un disque d'acier de diamètre constant, en fonction de l'épaisseur.

Les aimants sont placés en a_1, a_2, a_3, a_4 , conformément au schéma 2 (fig. 1) de la page 278. En ces 4 points, le tube d'aluminium est fendu suivant deux mêmes génératrices et les aimants glissés dans les fentes. L'axe du tube se trouve ainsi dans le plan des aimants.

Un fil de laiton de 4 mm. de longueur et 0.8 mm. de diamètre est glissé dans le tube, à une distance de 5 mm. de l'extrémité supérieure. Le tube ainsi renforcé peut être serré sans dommage dans la pince du dispositif de blocage mentionné page 284.

Le fil de suspension est en quartz. Il a 2 à 3 μ de diamètre. Les deux extrémités sont argentées, puis cuivrées. Une des extrémités entre exactement dans le tube d'aluminium grâce à un diamètre d'environ 0.8 mm. De ce fait, le montage du fil de quartz est facile et le centrage sur le tube d'aluminium parfait.

Les poids et moments d'inertie des différentes parties de l'équipage sont les suivants :

| | Poids | Moments d'inertie |
|--|-------------|-------------------------------------|
| Tube d'aluminium | 60 mgr. | 13 |
| Miroir | 5 « | 8 |
| Fil de laiton de 4 mm. | 18 « | 1.5 |
| Fil d'acier. | négligeable | 1.0 |
| Quatre aimants | 30 mgr. | 30.0 |
| Disque de compensation | 3 « | 3.0 |
| Deux anneaux d'aluminium. | 3 « | 1 (0.7) |
| Extrémité cuivrée du fil de quartz . . | 9 « | 1 (0.7) |
| | 128 mgr. | 58 mgr. |
| | | mm ² = 0.00058 c.g.s. |

On voit notamment que le disque de compensation a un moment d'inertie négligeable par rapport au moment d'inertie total (6% environ). Sa présence n'entraîne donc qu'un déficit négligeable sur la sensibilité de l'instrument.

Les aimants ne sont distants que de 14 mm. Ceci oblige à avoir des bobines d'un diamètre extérieur maximum de 13 mm., ce qui est peu. Mais il était nécessaire de répartir les aimants sur une distance assez courte pour que le « champ terrestre » puisse être considéré comme variant linéairement dans tout l'espace occupé par les aimants. Cette condition est pratiquement réalisée avec une distance entre aimants de 14 mm.

Le galvanomètre comporte quatre paires de bobines, cylindriques, de caractéristiques suivantes :

| | |
|---------------------|---------|
| diamètre extérieur: | 13 mm. |
| diamètre intérieur: | 5.3 mm. |
| longueur: | 3.5 mm. |

Il est indispensable, mais difficile, de construire des bobines qui ne soient pas du tout magnétiques.

Nous avons dû tout d'abord nous procurer du fil de cuivre non magnétique, nous n'y sommes parvenus qu'après beaucoup de recherches et d'essais.

Il a fallu éviter ensuite que la bobine ne devienne magnétique en cours de construction.

Tout contact avec un outil d'acier a dû être évité: les supports des bobines, en verre cuivré électrolytiquement au laboratoire même, ont été achevés au papier de verre.

Les seuls isolants utilisés sont l'orca et le celluloïd, tous deux diamagnétiques.

Pour le bobinage même, nous avons procédé de la manière suivante:

Le mandrin, en laiton et verre, était recouvert de cire d'abeille et de gélatine. Le fil était collé au fur et à mesure du bobinage au moyen d'une solution de celluloïd dans de l'acétone. La bobine achevée était couverte de gélatine.

La gélatine, diamagnétique, protégeait la bobine du contact de la cire qui, elle, est souvent magnétique: Il suffisait de chauffer le mandrin pour retirer la bobine achevée. En plongeant celle-ci successivement dans le chloroforme et l'eau chaude, on la débarrassait de la cire et de la gélatine.

Nous avons construit deux galvanomètres ne différant que par leurs résistances. Le diamètre du fil des bobines du premier galvanomètre est de 0.07 mm. La résistance maximum (bobines toutes en série) est de 1960 Ω ; la résistance minimum (bobines toutes en parallèle), de 30 Ω environ.

Le diamètre du fil des bobines du deuxième galvanomètre est de 0.2 mm. La résistance maximum atteint 29.5 Ω et la résistance minimum 0.5 Ω environ. Nous donnerons plus loin les sensibilités de ces deux instruments.

Outre ces huit bobines, l'appareil est muni de quatre petites bobines supplémentaires au centre desquelles oscille le disque de compensation. Ces quatre bobines « d'astatisation » permettent d'aimanter le disque dans deux directions perpendiculaires suivant la méthode exposée page 285.

L'adjonction du disque de compensation ne doit pas obliger à augmenter plus que nécessaire la longueur de l'axe mobile. C'est pourquoi les quatre bobines d'astatisation doivent être très petites. Elles doivent produire un champ qui peut atteindre 150 gauss; il faut donc qu'elles soient bobinées avec un fil très fin et parcourues par un courant relativement intense pendant un temps très court.

Nous avons construit des bobines tronc-côniques disposées dans un cadre isolant. Le plus grand diamètre des bobines est de 8 mm., le plus petit de 3 mm., et l'épaisseur de 2.5 mm. Le fil a 0.07 mm. de diamètre.

La place dont nous disposons ici ne nous permet pas de donner une description détaillée de l'instrument. Nous nous contenterons seulement d'en mentionner quelques particularités:

1^o Les bobines sont fixées sur des tubes en verre cuivré. Ces tubes permettent de voir entièrement les aimants, ce qui facilite le réglage. On peut en outre, dans les tubes, introduire des tiges de cuivre électrolytique qui, approchées des aimants, produisent un amortissement électromagnétique assez considérable¹).

2^o Chaque bobine possède deux bornes à l'extérieur du galvanomètre. On peut donc, en reliant les bobines, soit en série, soit en parallèle, faire varier la résistance de l'instrument dans le rapport de 64 à 1. Les deux galvanomètres décrits ici possèdent ainsi:

le premier, une résistance variable de 1960 Ω à 30 Ω environ,
le second, une résistance variable de 29.5 Ω à 0.5 Ω environ.

3^o Les différentes parties du galvanomètre (bobines, bobines d'astatisation, système de blocage) sont réglables dans toutes les directions.

4^o L'axe peut être bloqué de façon parfaite. L'instrument est donc facilement transportable.

5^o Deux systèmes d'aimants placés sous le socle de l'instrument permettent, par simple rotation, l'un, de faire varier la position du zéro; l'autre, de faire varier la période (donc la sensibilité effective) de 1.5 secondes jusqu'à l'instabilité de l'équipage.

3. Astatisation. Manipulations.

Celle-ci nécessite la production d'un champ rigoureusement uniforme, dont on puisse faire varier la direction et l'intensité. C'est pour ce champ que le galvanomètre est astatisé.

¹) Voir page 291.

Nous avons utilisé le champ produit par un cadre rectangulaire haut de 220 cm., large de 46 cm., possédant une dizaine de spires. Le galvanomètre est placé au centre du cadre. Celui-ci est installé verticalement et peut tourner autour d'un axe vertical coïncidant avec l'axe du galvanomètre. L'uniformité du champ, le long de l'axe du galvanomètre, est très satisfaisante; en effet, les deux paires d'aimants de l'équipage sont placées dans des champs différant seulement de $\frac{1}{40\,000}$ environ. On donne les directions désirées au champ uniforme en faisant tourner le cadre.

Un champ de quelques centièmes de gauss suffit amplement pour atteindre l'astatisation la plus parfaite, les variations du « champ terrestre » atteignent rarement des valeurs aussi grandes.

En faisant agir le champ uniforme perpendiculairement aux aimants de l'équipage, puis parallèlement à ceux-ci, les déviations du galvanomètre donnent la valeur des deux composantes des moments magnétiques de l'équipage considérées page 279.

On annule successivement ces deux composantes en aimantant le disque de compensation au moyen des deux paires de bobines spéciales décrites plus haut.

Rappelons que la durée de passage du courant à travers les bobines doit être courte. Cette durée, de l'ordre de $\frac{1}{100}$ de seconde, est réglée au moyen d'un pendule (genre pendule de Helmholtz).

La courte durée de passage du courant permet en outre d'astatiser sans devoir bloquer l'équipage; celui-ci ne tourne que d'un angle faible en $\frac{1}{100}$ de seconde et le choc reçu est tout à fait supportable par le fil de quartz.

L'aimantation à donner au disque de compensation atteint à peu près les 3% de l'aimantation à saturation. Malgré cette faible valeur, et conformément à ce que nos essais avaient fait prévoir (voir page 280), les aimantations données successivement dans les deux directions perpendiculaires ne s'ajoutent pas géométriquement; en annulant une des composantes on agit sur l'autre. Des tâtonnements sont nécessaires pour arriver à l'astatisation totale, mais en fait ils se réduisent à peu de chose.

Il est facile, en une demi-heure, de réduire dans le rapport de 400 à 1 l'influence du champ du cadre.

A titre de contrôle, nous avons constaté qu'un puissant électroaimant placé à 10 mètres du galvanomètre provoquait une déviation du spot de 200 mm. avant l'astatisation. Après astatisation soignée, la déviation due à l'électro-aimant n'était plus que de $\frac{1}{2}$ à $\frac{1}{3}$ de mm.

Notre procédé d'astatisation est donc tout à fait satisfaisant. Des vérifications faites plusieurs mois après l'astatisation ont montré que celle-ci ne variait pratiquement pas.

4. Comparaison entre galvanomètres à deux et à quatre aimants.

Nous avons montré, page 277, la nécessité d'utiliser un équipage astatique possédant au moins quatre, ou trois, groupes d'aimants. Nous admettions que les fluctuations de zéro des types anciens de galvanomètres à aimants mobiles étaient dûes autant au fait que le « champ terrestre » n'est pas uniforme le

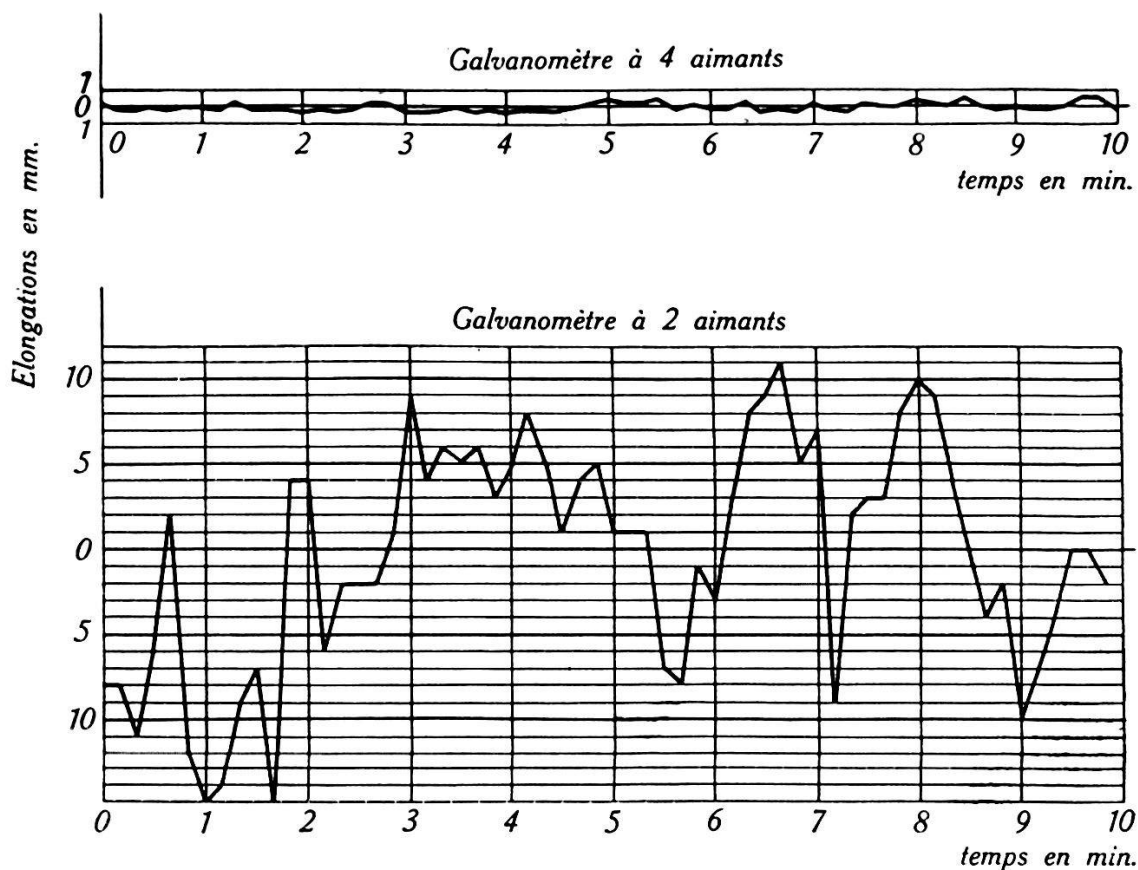


Fig. 3.

Variations de zéro. Observations de jour.

long de l'axe du galvanomètre, qu'au défaut d'astatisation pour un champ uniforme.

L'influence de la non uniformité du « champ terrestre » ayant été récemment contestée¹⁾, il nous a paru intéressant de comparer deux galvanomètres de construction identique, astatisés au même degré et ne différant que par le nombre des aimants. L'un de ces galvanomètres est celui que nous venons de décrire.

¹⁾ HASCHÉ, op. cit.

Il possède quatre aimants (tenant lieu de quatre groupes d'aimants). Le second ne possède que deux aimants. Les dimensions des aimants, distance entre ceux-ci, etc. sont les mêmes dans les deux instruments.

Nous avons observé, de 10 en 10 secondes, les positions de zéro des deux instruments. Des séries d'observations ont été faites de jour et de nuit.

La période totale était d'à peu près 8 secondes pour les deux galvanomètres et l'échelle sur laquelle était observé le spot était placée à 2 m.

Les graphiques (fig. 3) sont relatifs aux observations faites de jour, les graphiques (fig. 4) aux observations de nuit. Le temps a

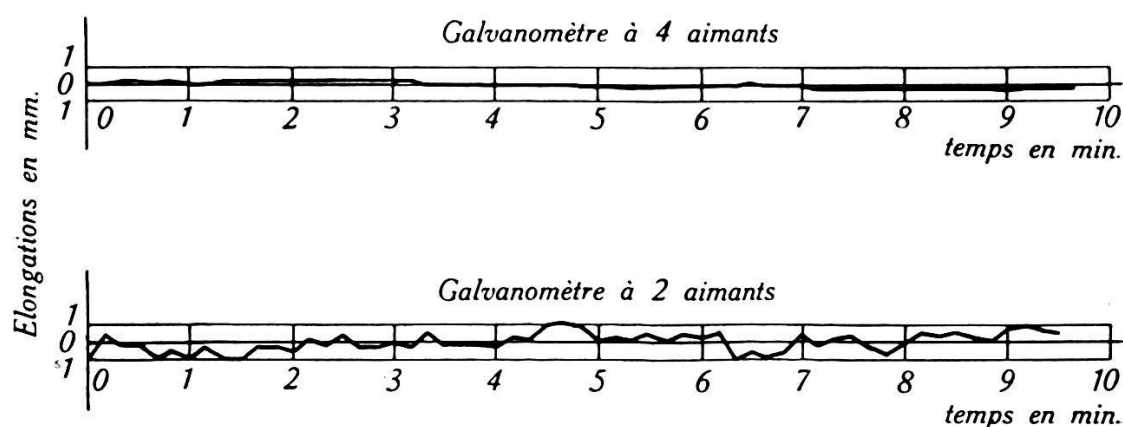


Fig. 4.

Variations de zéro. Observations de nuit.

été porté en abscisses et les fluctuations de zéro en ordonnées. Celles-ci sont comptées à partir de la position moyenne du zéro.

Les variations moyennes de zéro déduites de ces graphiques sont:

Observations de jour.

Galvanomètre à quatre aimants: 0.25 mm.

» » deux aimants: 6.7 mm.

Observations de nuit.

Galvanomètre à quatre aimants: 0.1 mm.

» » deux aimants: 0.6 mm.

D'autre part, nous avons fait agir sur les deux galvanomètres un champ variable, certainement pas uniforme, en déplaçant un aimant verticalement¹⁾.

¹⁾ Distance aimant-galvanomètre: 2 m. Ampleur du déplacement vertical: environ 1.50 m.

Les variations de zéro constatées ont été de :

0.4 mm. pour le galvanomètre à quatre aimants,

10.9 mm. pour le galvanomètre à deux aimants.

Un champ non uniforme agit donc 27 fois plus sur le galvanomètre à deux que sur le galvanomètre à quatre aimants.

Or les graphiques mentionnés ci-dessus montrent que *les variations ordinaires de zéro (de jour)¹⁾ sont également 20 à 30 fois plus grandes pour le galvanomètre à deux que pour le galvanomètre à quatre aimants.* On peut en conclure que les variations ordinaires de zéro sont certainement dûes aux inhomogénéités du « champ terrestre » et que par conséquent l'équipage à quatre aimants s'impose.

Nous ne donnerons donc que les résultats concernant le galvanomètre à quatre aimants²⁾.

III.

5. Proportionnalité entre courant et déviation.

La proportionnalité a été vérifiée pour trois périodes : 1.53 secondes, 5.4 secondes, 8.6 secondes. (Voir tableau I.)

Nous indiquons, dans la première colonne, les intensités de courant traversant le galvanomètre et, dans la seconde, les déviations correspondantes, en mm., observées sur une échelle placée à 1 m. du galvanomètre. L'unité d'intensité de courant, arbitraire, a été choisie de telle manière qu'un même nombre représente une des déviations observées et l'intensité de courant correspondante. Ce nombre est souligné dans chaque série. De cette manière, la comparaison entre courant et déviation est aisée.

Tableau I.

| I T (Période totale) = 1.53 sec. | |
|----------------------------------|----------------------|
| Intensités de courant | Déviations observées |
| 26.6 | 26.5 mm. |
| 52.7 | 52.7 « |
| 104.9 | 104.9 « |
| 208.1 | 208.1 « |
| 412.3 | 408.8 « |

¹⁾ De nuit, la différence entre galvanomètres à deux et à quatre aimants est moins accusée. La cause en est probablement que les trépidations provoquent pour une bonne part la variation moyenne de 0,1 mm. constatée avec le galvanomètre à quatre aimants.

²⁾ Ces résultats ont été obtenus avec le galvanomètre déjà mentionné page 283, dont la résistance totale maximum est de 1960 Ω . Ayant achevé récemment un deuxième galvanomètre dont la résistance maximum n'est que de 29,5 Ω nous indiquerons également la sensibilité atteinte avec cet instrument.

| II $T = 5.4$ sec. | |
|-----------------------|----------------------|
| Intensités de courant | Déviations observées |
| 25.8 | 25.8 mm. |
| 51.5 | 51.5 « |
| 102.6 | 102.8 « |
| 205.3 | 205.3 « |
| 410.8 | 408.7 « |
| III $T = 8.6$ sec. | |
| 28.3 | 28.7 mm. |
| 57.0 | 57.3 « |
| 114.0 | 114.6 « |
| 228.7 | 228.7 « |
| 459.0 | 457.0 « |

6. Sensibilité.

Appelons, avec Otto Werner¹⁾, sensibilité normale, S_N , du galvanomètre, la déviation en mm., mesurée sur une échelle placée à 1 m., produite par un courant de 10^{-6} ampères, la résistance du galvanomètre étant de 1 Ω et sa période totale d'oscillation de 10 secondes.

La sensibilité normale a été déterminée avec une période de 1.54 secondes, la résistance du galvanomètre étant de 1960 Ω (bobines en série). Pour cette période et cette résistance, la sensibilité effective (courant produisant une déviation de 1 mm. à 1 m.) était de

$$1.06 \times 10^{-9} \text{ ampères.}$$

On en déduit une sensibilité normale S_N égale à 900.

Nous donnons (fig. 5) la variation de la sensibilité effective en fonction du carré de la période. Les périodes ont été déterminées en circuit ouvert. On remarquera que l'amortissement dû à l'air est faible: la variation de la sensibilité en fonction du carré de la période est presque linéaire.

Il est difficile d'indiquer une sensibilité effective maximum du galvanomètre puisqu'on peut augmenter la durée d'oscillation jusqu'à l'instabilité de l'équipage. *Notons, à titre de renseignement, que nous avons constaté une sensibilité de 6.5×10^{-12} ampères.* Le galvanomètre était alors aperiodique. La période totale de l'appareil non amorti aurait été d'environ 19.7 secondes.

Notons également que, ainsi que nous l'avons fait remarquer page 280, *le procédé d'astatisation est suffisamment simple pour que les dimensions de l'équipage puissent être grandement réduites. On obtiendrait alors une sensibilité normale bien supérieure à 900.*

¹⁾ OTTO WERNER: Empfindliche Galvanometer für Gleich- und Wechselstrom, 1928.

Seule la sensibilité au courant de ce galvanomètre est intéressante. La résistance intérieure est trop grande pour que la sensibilité à la tension soit remarquable.

C'est pourquoi nous avons construit un second galvanomètre dont la résistance maximum est de 29.5Ω . En mettant toutes les bobines en parallèle, la résistance n'est plus que de 0.5Ω environ.

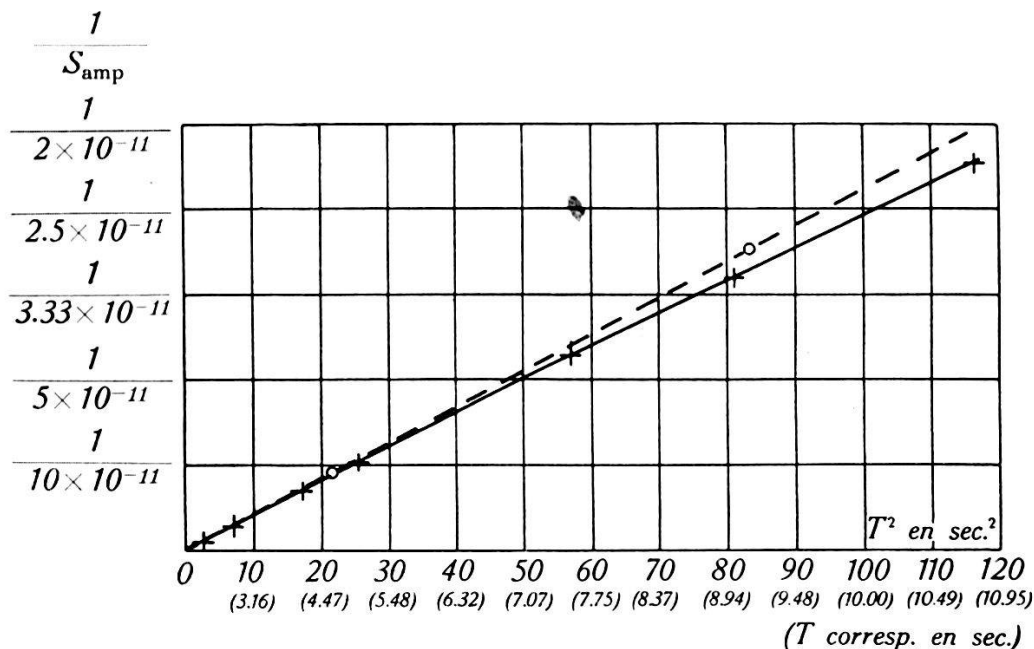


Fig. 5.

Sensibilité du galvanomètre en fonction du carré de la période.

Dans ces conditions, pour une période de 10 secondes, l'échelle étant placée à 1 m., la sensibilité à la tension est de

$$S_v = 6 \times 10^{-10} \text{ volts.}$$

Notons, à titre de comparaison, que le plus sensible des galvanomètres à aimants mobiles astatiques, *sans protection magnétique*, se trouvant actuellement sur le marché, a une sensibilité normale égale à 150 et que le *galvanomètre à cadre* le plus sensible n'atteint qu'une sensibilité de 3×10^{-8} volts pour une déviation de 1 mm. mesurée à 1 m.¹⁾

7. Amortissement.

Contrairement à ce qu'on observe en général avec les galvanomètres à aimants mobiles, l'amortissement électro-magnétique est relativement considérable en circuit fermé.

¹⁾ O. WERNER, op. cit.

On peut, en outre, au moyen des tubes-supports de bobines mentionnés page 284, approcher des tiges de cuivre électrolytique des aimants¹⁾.

Grâce à cette double source d'amortissement, on peut rendre le galvanomètre quasi apériodique pour toutes les périodes et toutes les résistances extérieures.

D'autre part, l'amortissement électro-magnétique dû au seul enroulement ne provoque un « traînage » sérieux que pour les grandes durées d'oscillation combinées avec une résistance extérieure très petite.

IV.

8. Variation de l'aimantation d'un disque d'acier de diamètre constant en fonction de l'épaisseur.

Nous désirions remplacer le groupe de petites aiguilles aimantées que l'on trouve habituellement dans un équipement de galvanomètre par un seul aimant en forme de plaque mince.

Théoriquement, en effet, il suffit d'amincir suffisamment la plaque pour que le champ démagnétisant, dans le plan de celle-ci, devienne très petit et, à la limite, nul, pour l'épaisseur nulle.

Il nous a paru nécessaire de déterminer expérimentalement la courbe de variation de l'intensité d'aimantation de la plaque en fonction de l'épaisseur, pour pouvoir choisir l'épaisseur la plus favorable et voir quelles intensités d'aimantation il était pratiquement possible d'atteindre.

Nous avons étudié des disques de même diamètre que les aimants de l'équipage du galvanomètre, soit 4 mm., du même acier (acier cobalt-chrom à 36% de cobalt).

Les disques étaient rodés au moyen de carborundum et d'émeri; pour chaque épaisseur, nous avons déterminé l'aimantation rémanente, avant et après le traitement de vieillissement.

Nous donnons (fig. 6) les variations de l'intensité d'aimantation I et du moment magnétique M en unités c.g.s., en fonction de l'épaisseur du disque. La courbe en pointillé donne I après le traitement de vieillissement (stabilisation par trépidations).

On voit que ces courbes ne s'accordent plus du tout avec les prévisions théoriques pour les faibles épaisseurs.

L'intensité d'aimantation, au lieu de croître continuellement, quand l'épaisseur diminue, présente un maximum pour

¹⁾ Procédé analogue à celui qui est utilisé par PASCHEN dans son « Eisen-galvanometer ».

une épaisseur d'environ 20μ , puis décroît fortement, entre 20 et 14μ , dernier point que nous ayons obtenu.

Les points isolés, pour 20 et 14μ , sont obtenus en maintenant le disque indéformable durant toutes les opérations (collé sur une lame de verre).

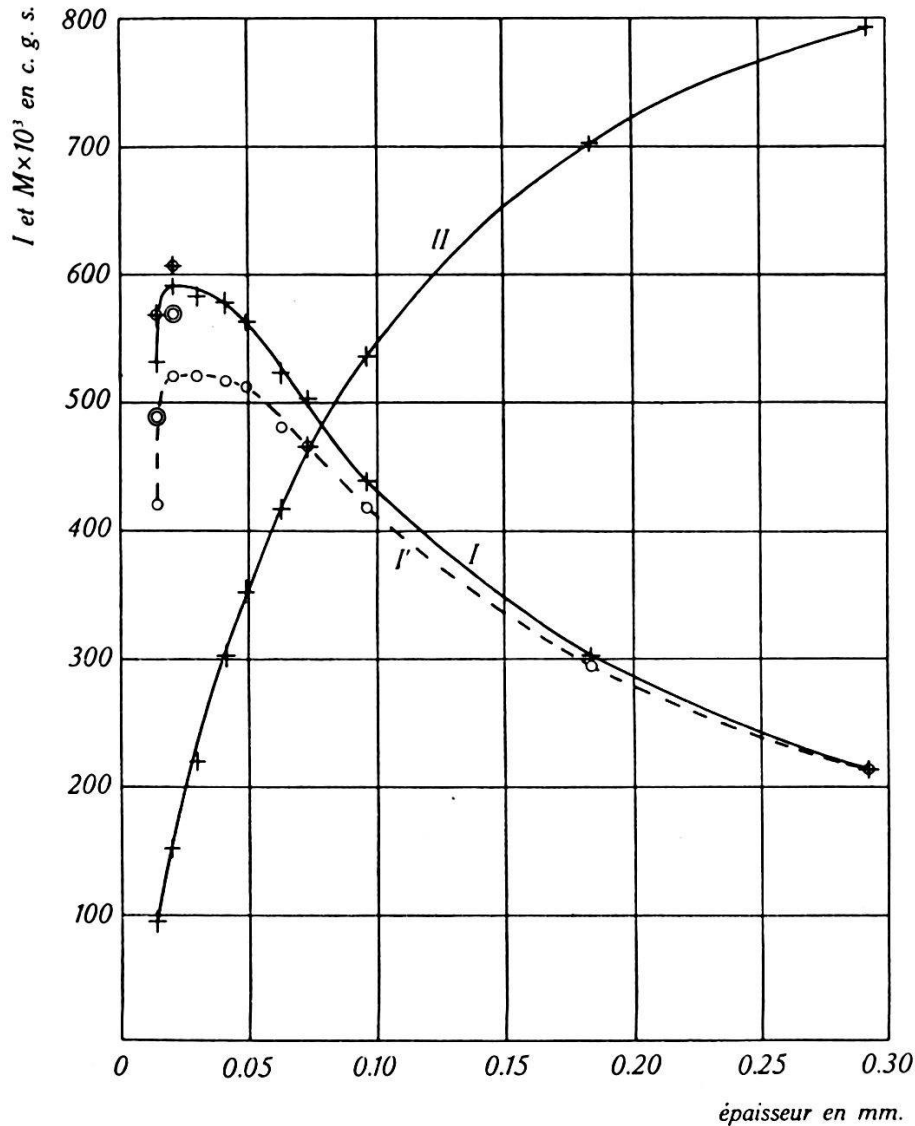


Fig. 6.

Variation de l'Intensité d'aimantation et du Moment magnétique d'un disque d'acier de diamètre constant, en fonction de l'épaisseur.

I. Intensité d'aimantation.

II. Moment magnétique.

I'. Intensité d'aimantation après stabilisation.

Ayant obtenu ces courbes imprévues avec un premier échantillon d'acier, nous avons répété les mesures avec un second échantillon, en nous entourant de toutes les précautions nécessaires: le magnétomètre spécial avec lequel nous mesurons les aimantations a été étalonné très soigneusement et sa sensibilité

vérifiée avant et après chaque mesure; l'épaisseur de l'acier était déterminée au moyen de pesées très précises, etc. Les difficultés techniques ne nous ont pas permis de diminuer l'épaisseur de l'acier au delà de 14μ .

Les courbes que nous avons obtenues pour ces échantillons différents sont identiques. Elles présentent toutes deux un maximum pour une épaisseur d'environ 20μ .

Il est difficile d'expliquer cette baisse de l'intensité d'aimantation, pour les faibles épaisseurs, par une modification de la section du disque ou par une détérioration due au rodage, car les deux échantillons étudiés se sont comportés identiquement, quoique ayant été traités quelque peu différemment, et à plusieurs mois d'intervalle d'ailleurs¹⁾.

9. Grandeur à donner au miroir d'un galvanomètre.

Les constructeurs de galvanomètres ne sont pas d'accord au sujet de la grandeur à donner au miroir.

Tandis que certains estiment qu'un miroir doit avoir au moins 8 mm. de diamètre, d'autres disent arriver à la lecture du $\frac{1}{10}$ de mm. à 3 m. avec un miroir de 2 mm. de diamètre seulement.

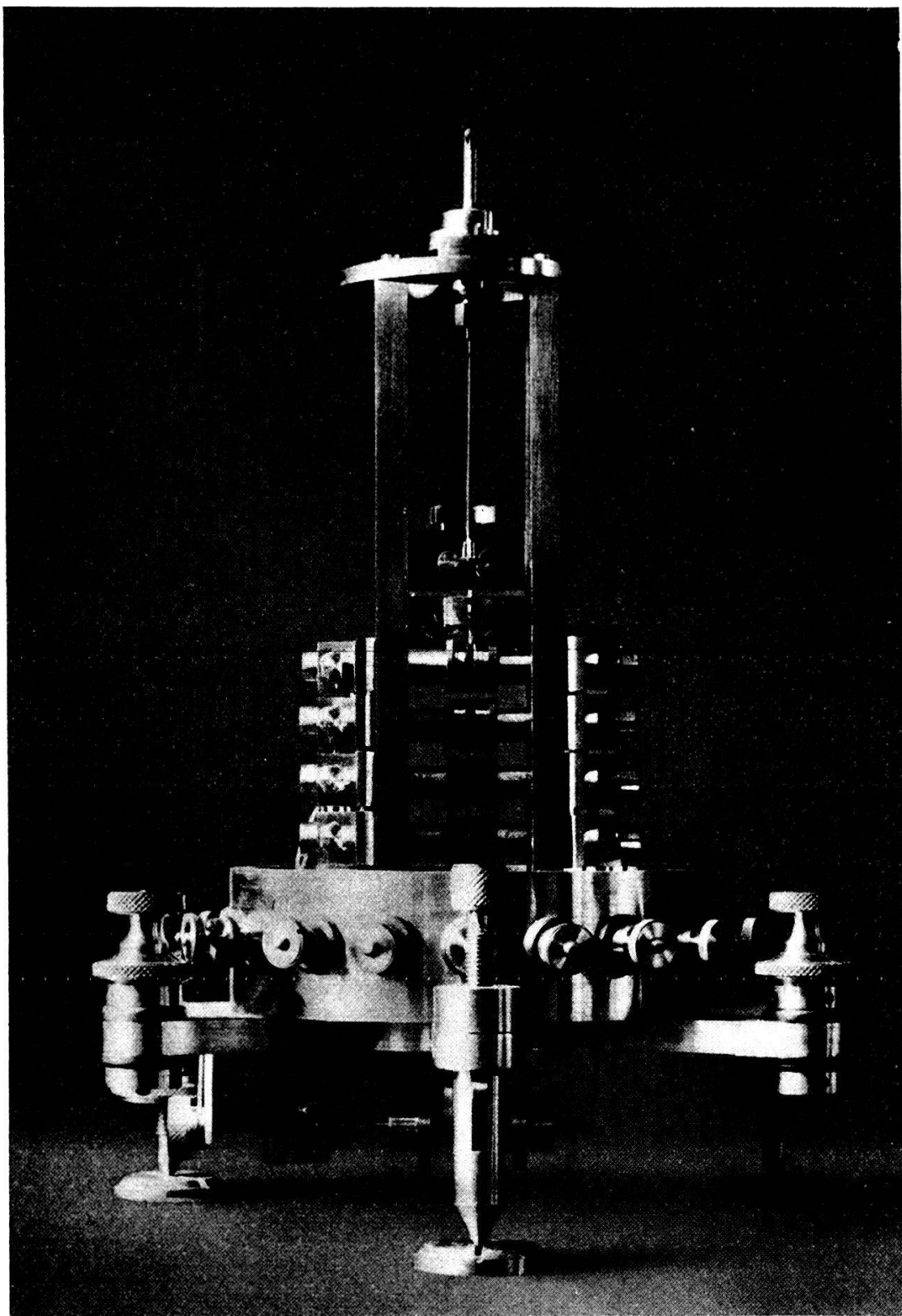
Nous avons essayé de fixer la limite de précision de lecture qu'il est possible d'atteindre, le spot étant donné par des miroirs rectangulaires de hauteur constante et de largeur variable. Nous avons substitué au miroir un diaphragme placé devant une lentille. La forme et les dimensions du diaphragme correspondent à la forme et aux dimensions du miroir. L'image d'un trait fin, noir sur fond lumineux, se formait, à 2 m., sur une échelle translucide solidaire du charriot d'une machine à diviser.

Il y a deux cas à envisager, suivant qu'il faut apprécier une déviation du spot ou que le galvanomètre est utilisé comme instrument de zéro.

1er cas: On déplace l'échelle d'une grandeur inconnue et on lit la position du spot sur l'échelle, ainsi que la graduation du tambour de la machine. On compare une série de lectures faites à la fois sur l'échelle et à la machine. Des écarts observés on déduit l'erreur moyenne, pour chaque diaphragme.

2e cas: Si le galvanomètre est employé comme instrument de zéro, il suffit de savoir avec quelle précision la position du spot peut être repérée.

¹⁾ Au sujet de l'explication de ces courbes tout à fait inattendues, voir: A. PERRIER: Sur des propriétés de la matière ferromagnétique en lames et fils minces, Helv. phys. Acta, Vol. V, p. 59, 1932.



Pour une première série d'observations, nous avons fait coïncider le trait noir du spot avec un trait de l'échelle. Dans une seconde série, le trait du spot a été amené entre deux traits de l'échelle. On note chaque fois l'indication de la machine à diviser et les écarts observés. On en déduit l'erreur moyenne.

Le tableau II ci-dessous contient le résumé des résultats obtenus. La colonne 1 donne les erreurs moyennes relatives à la lecture d'une déviation, les colonnes 2 et 3 les erreurs moyennes pour la méthode de zéro.

Tableau II.

| <i>Largeur du miroir</i> | 1 <i>Lecture d'une déviation</i> | 2 <i>Trait sur trait</i> | 3 <i>Entre traits</i> |
|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 16 mm. | 0,030 mm. | 0,012 mm. | 0,010 mm. |
| 8 « | 0,034 « | 0,017 « | 0,009 « |
| 4 « | 0,060 « | 0,015 « | 0,012 « |
| 2 « | 0,054 « | 0,025 « | 0,026 « |
| 1 « | 0,118 « | 0,055 « | 0,058 « |

Un trait lumineux, comme spot, au lieu d'un trait noir, donne une précision plus grande pour la méthode de zéro, mais par contre une précision très faible dans l'appréciation d'une déviation.

Remarquons que ces résultats ont en ce sens une valeur assez relative, qu'ils dépendent fortement de l'observateur.

D'autre part, il n'a pas été tenu compte du temps employé à faire les lectures, temps nécessairement plus grand quand l'image du fil est étalée par les miroirs très étroits (1 et 2 mm), que quand cette image est fine (miroirs larges de 4 mm. et plus). Or le temps dont on dispose pour faire une lecture est fonction de la période de l'instrument et doit être tel qu'il permette d'utiliser la rapidité de celui-ci.

Nous croyons cependant pouvoir tirer de cette étude les conclusions suivantes :

- 1^o Si un galvanomètre est uniquement employé comme instrument de zéro, un miroir de 1 mm. de large permet encore une précision de 0.1 mm. à 2 m. de distance.
- 2^o Si l'on doit apprécier les déviations du galvanomètre, il n'est pas à conseiller, pour obtenir la même précision, de prendre un miroir de moins de 4 mm. de largeur.

Laboratoire de Physique.
Ecole Polytechnique. Université libre de Bruxelles.