



Sur la mesure absolue des champs magnétiques et la détermination de l'ampère en valeur absolue

G. Dupouy, R. Jouaust

► To cite this version:

G. Dupouy, R. Jouaust. Sur la mesure absolue des champs magnétiques et la détermination de l'ampère en valeur absolue. Journal de Physique et le Radium, 1935, 6 (3), pp.123-134. <10.1051/jphys-rad:0193500603012300>. <jpa-00233306>

HAL Id: jpa-00233306

<https://hal.science/jpa-00233306v1>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

SUR LA MESURE ABSOLUE DES CHAMPS MAGNÉTIQUES ET LA DÉTERMINATION DE L'AMPÈRE EN VALEUR ABSOLUE

Par MM. G. DUPOUY et R. JOUAUST.

Sommaire. — Nous avons fait des mesures absolues de champs magnétiques par la méthode électromagnétique (balance de Cotton) et la méthode d'induction afin de confronter les résultats obtenus par chacune d'elles; d'après quelques auteurs ces résultats présenteraient un écart systématique de 2 pour 1 000, ce qui amènerait à penser que la définition de l'ampère international est erronée de 1 pour 1 000 environ.

Nous nous sommes servis d'appareils électriques étalonnés par le Laboratoire Central d'Électricité et comparés périodiquement aux étalons des différents laboratoires nationaux étrangers (Bureau of Standards, National Physical Laboratory, Physikalische Technische Reichsanstalt).

De plus la détermination des constantes géométriques de nos instruments de mesures (balance, bobines) a été effectuée par les soins du Bureau International des Poids et Mesures.

Nous avons trouvé que les deux méthodes sont d'accord entre elles à la précision de nos mesures (quelques dix-millièmes); l'écart de 2 pour 1 000 signalé n'existe donc pas en réalité.

Nos mesures nous permettant en outre de déterminer la valeur de l'ampère international : le résultat que nous obtenons s'accorde — à la précision de 1 dix-millième — avec celui qui provient d'une détermination toute récente faite par les soins du Bureau of Standards.

1. Introduction. — Deux méthodes sont principalement utilisées pour la mesure des champs magnétiques en valeur absolue : ce sont la méthode d'induction et la méthode électromagnétique.

Plusieurs expérimentateurs ⁽¹⁾ opérant simultanément par ces deux méthodes ont trouvé que les résultats qu'elles donnent présentent un écart systématique : les nombres obtenus par la méthode électromagnétique sont inférieurs de 2 pour 1 000 environ à ceux que fournit la méthode d'induction. M. A. Piccard écrivait en 1920 ⁽²⁾ que pour expliquer un pareil désaccord « il faut admettre que la définition électromagnétique de l'ampère présente avec celle donnée par le volt international et l'ohm international une contradiction probable de 0,9 pour 1 000 ».

Or les mesures absolues de l'ampère faites dans différents laboratoires spécialisés atteignent une précision de l'ordre du dix-millième ⁽³⁾. Il y a donc là un désaccord jusqu'ici inexpliqué.

L'un de nous a réalisé à Bellevue, au Laboratoire du Grand Electro-Aimant de l'Académie des Sciences, une installation destinée à des mesures précises de champs magnétiques en vue des diverses recherches effectuées au Laboratoire. C'est avec cette installation que des mesures ont été faites afin de chercher si le désaccord entre les deux méthodes existe ou non.

Plusieurs concours nous ont été indispensables pour mener à bonne fin ce travail. Nous avons eu recours pour toutes les mesures absolues de longueurs aux installations métrologiques du Bureau International des

Poids et Mesures (Pavillon de Breteuil, à Sèvres). MM. Ch. Ed. Guillaume et A. Pérard nous ont toujours très aimablement accueillis à Breteuil et ont bien voulu que M. Bonhoure, Assistant au Bureau, fasse l'étude détaillée de la balance de Cotton et des bobines dont nous nous sommes servis. Nous le remercions bien vivement de cette précieuse collaboration. D'autre part, les étalons électriques utilisés ont été mesurés par les soins du Laboratoire Central d'Électricité de Paris. Nous remercions M. Picard, qui s'est chargé de ce travail. Une résistance de $1/10^6$ d'ohm a été également étalonnée par le National Physical Laboratory de Londres.

2. Principe des deux méthodes. — La méthode électromagnétique consiste à mesurer l'action qu'exerce le champ magnétique sur un conducteur parcouru par un courant connu. Cette méthode a été très souvent utilisée depuis 1900 par plusieurs expérimentateurs. On doit à M. Cotton ⁽⁴⁾ un type de balance électromagnétique qui se prête particulièrement bien à ce genre de mesures.

Cette balance a été modifiée depuis par différents auteurs; en particulier par P. Sève et A. Piccard.

La formule qui donne l'expression du champ magnétique, mesuré par ce procédé, est du type :

$$\mathcal{H} = \frac{C_1}{i} \quad (1)$$

où i désigne l'intensité du courant passant dans la balance et C_1 une constante que l'on détermine en valeur absolue uniquement par des mesures de longueurs et de masses.

On peut appliquer de bien des manières la méthode d'induction; tous les procédés reviennent, en définitive, à disposer dans le champ magnétique une bobine de surface connue dont les spires sont normales aux lignes de force. On retire alors cette bobine hors du champ

⁽¹⁾ P. SÈVE. *Ann. Phys. Chim.*, 1912, 27, p. 189. — A. PICCARD. *Arch. Sc. Phys. et Nat.*, 3^e Série, 1920, 2, p. 455. — G. FOEV. *Ann. Phys.*, 9^e Série, 1921, 16.

⁽²⁾ A. PICCARD. *Loc. cit.*, p. 485.

⁽³⁾ Voir à ce sujet, par exemple, le Rapport de M. HARVEY. L. CURTIS. au *Congrès international d'Électricité*, Paris, 1932, Vol. III, 2^e Section, p. 92.

Pendant la rédaction de cet article nous avons eu connaissance d'un travail tout récent de MM. H. L. CURTIS et R.-W. CURTIS qui ont procédé à une nouvelle détermination de l'ampère (*Bureau of Standards Journal of Research*, 1934, vol. 12, p. 665). Ces auteurs ont trouvé le résultat suivant : 1 Ampère International B. S. = 0,999928 ampère absolu $\pm 2,10 \cdot 10^{-5}$.

⁽⁴⁾ A. COTTON. *L'Eclairage Electrique*, 1900, t. 24. Résumé dans le *J. Phys.*, 1900, 9, 383.

magnétique ou bien on la retourne face pour face ; on mesure la quantité d'électricité induite en la comparant à celle qui est créée dans le secondaire d'une inductance mutuelle étalon quand on inverse le courant dans le primaire.

Quand on emploie cette méthode le champ est donné par la formule :

$$\mathcal{H} = C_2 \times i \quad (2)$$

où i représente l'intensité du courant qui passe dans le primaire de l'inductance et C_2 une constante déterminée en valeur absolue uniquement par des mesures de longueurs.

Remarques. — I. Nous venons de voir que la balance de Cotton peut servir à la mesure d'un champ magnétique. L'emploi simultané des deux méthodes permet la détermination en valeur absolue du courant utilisé ; on a en effet :

$$i = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}$$

La combinaison des deux méthodes fournit donc un résultat équivalent à celui que l'on obtient avec un électrodynamomètre absolu.

II. Dans le cas où pour la mesure du courant on aurait utilisé une unité autre que celle du système absolu, l'ampère international par exemple, si l'on désigne par i l'intensité du courant ainsi mesuré, par $1 + \alpha$ le rapport : $\frac{\text{ampère international}}{\text{ampère absolu}}$, les valeurs absolues des champs sont respectivement :

$$\mathcal{H}(\text{balance}) = \frac{C_1 (1 + \alpha)}{i}$$

$$\mathcal{H}(\text{induction}) = \frac{C_2 i}{1 + \alpha}$$

valeurs qui naturellement sont identiques. En désignant par \mathcal{H}'_1 et \mathcal{H}'_2 les valeurs apparentes de ces champs fournies par les mesures, ces relations peuvent s'écrire :

$$\mathcal{H}(\text{balance}) = \mathcal{H}'_1 (1 + \alpha)$$

$$\mathcal{H}(\text{balistique}) = \frac{\mathcal{H}'_2}{1 + \alpha}$$

$$\text{d'où : } \frac{\mathcal{H}'_2}{\mathcal{H}'_1} = (1 + \alpha)^2 \sim 1 + 2\alpha.$$

Autrement dit, l'écart entre l'unité de courant utilisée et l'unité absolue se traduira par un écart double entre les valeurs des champs mesurés par les deux méthodes et le rapport de ces valeurs permettra de calculer le rapport entre l'unité de courant employée et l'unité absolue.

III. Les équations précédentes nous montrent également que

$$\mathcal{H} = \sqrt{\mathcal{H}'_1 \cdot \mathcal{H}'_2}$$

ce qui indique qu'en prenant la moyenne géométrique des deux valeurs apparentes du champ magnétique, on obtient néanmoins sa valeur correcte.

3. Electro-aimant. — Les champs magnétiques mesurés sont produits par un électro-aimant du type Weiss.

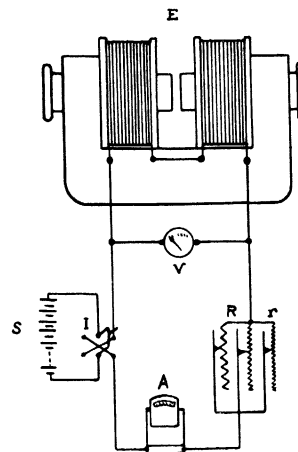


Fig. 1.

Le circuit de l'électro-aimant E (fig. 1) est alimenté par une batterie d'accumulateurs indépendante S utilisée seulement pour ces mesures. Le courant est repéré par un ampèremètre de précision Siemens et Halske A compensé des variations de température ; on règle ce courant au moyen d'un jeu de rhéostats R, r montés en parallèle. Un voltmètre V mesure la tension aux bornes de l'électro-aimant (105 volts en moyenne). Enfin un inverseur I permet de faire décrire, avant chaque mesure, une série de cycles d'aimantation au circuit magnétique de l'électro-aimant. Nous effectuons 10 inversions complètes en attendant, chaque fois, que le courant se stabilise à sa valeur de régime.

Nous avons opéré avec deux paires de pièces polaires et dans des entrefers donnant des champs très différents ; ces entrefers furent choisis de telle sorte que l'on obtienne un champ uniforme dans un volume aussi grand que possible ; en voici les caractéristiques se rapportant au courant de 9 ampères.

1^{re} paire : cylindriques ; diamètre 92 mm, entrefer 27,5 mm ; champ magnétique : 8 350 gauss environ.

2^e paire : tronconiques ; diamètre de la grande base 92 mm ; diamètre de la petite base 50 mm, angle d'ouverture du cône 60° ; entrefer 8 mm ; champ magnétique : 20 750 gauss environ.

4. Topographie du champ magnétique. — Nous avons fait pour chaque entrefer une étude très précise de la topographie du champ magnétique à mesurer afin de pouvoir faire les corrections dûes au manque d'homogénéité de ce champ dans l'espace où se trouvaient placés les appareils de mesure et aussi afin de pouvoir déterminer la meilleure position à donner à ces appareils dans le champ.

Nous avons employé pour cela une méthode différentielle susceptible d'une très grande précision.

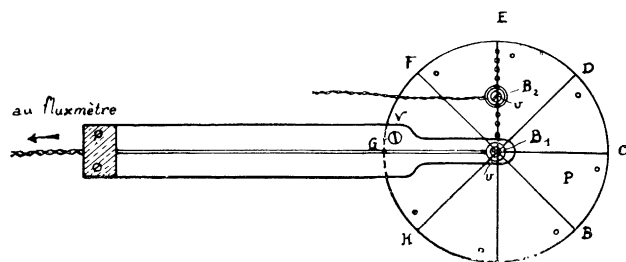


Fig. 2.

Nous nous servons d'une bobine composite (fig. 2) formée de deux bobines enivoire B_1 et B_2 de 5 mm de diamètre et de 6 mm de hauteur; leurs surfaces ne diffèrent entre elles que de quelques millièmes et sont très voisines de la valeur 70 cm^2 . Chacune d'elles est percée suivant son axe d'un trou qui permet le passage d'une vis V en cuivre rouge, non magnétique, servant à sa fixation. Un disque de cuivre P est fixé à la bobine B_1 de telle sorte que son centre coïncide avec celui de la bobine; ce disque est fixé, d'autre part, de façon rigide, sur le manche de la bobine par une seconde vis V . Cette bobine B_1 est placée dans toutes les mesures au centre de l'entrefer.

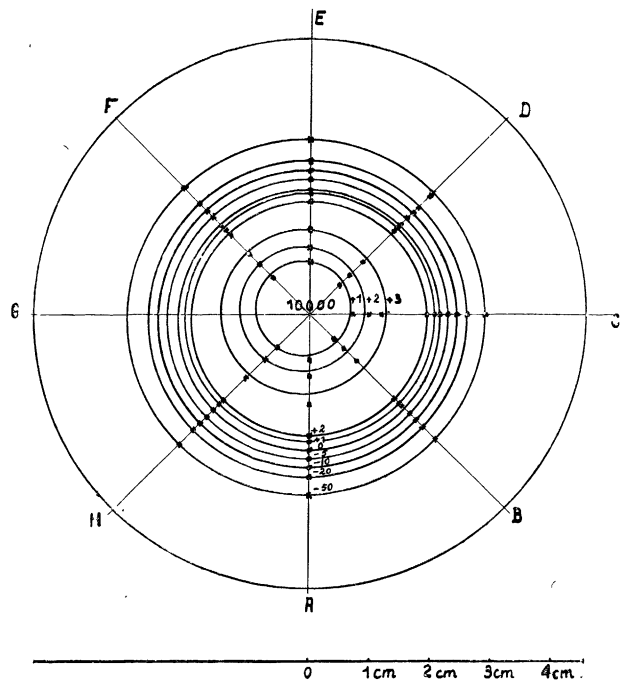


Fig. 3.

Les valeurs des champs sont exprimées en unités arbitraires.

Les deux bobines sont réunies de telle sorte que les flux produits à travers chacune d'elles opposent leurs effets; on les relie toutes deux en série avec un fluxmètre très sensible, à suspension par fil de cocon et muni d'un miroir.

L'exploration du champ magnétique se fait en déplaçant la bobine B_2 suivant un rayon fixe le long duquel sont des trous taraudés; puis on fait tourner de 45° la ligne des trous de façon à explorer le champ suivant un autre rayon.

Les diagrammes des figures 3 et 4 indiquent la disposition des lignes de champ constant. Pour les pièces polaires cylindriques, dans un cercle de 4 cm de diamètre autour du centre de l'entrefer, les variations du champ magnétique ne dépassent pas 0,3 pour 1 000.

Pour les pièces polaires tronconiques les variations du champ sont évidemment un peu plus importantes: ce qui les accentue encore c'est que l'entrefer est cette fois petit (8 mm) et qu'une légère flexion des montants formant la culasse de l'électro-aimant altère le parallélisme des faces polaires.

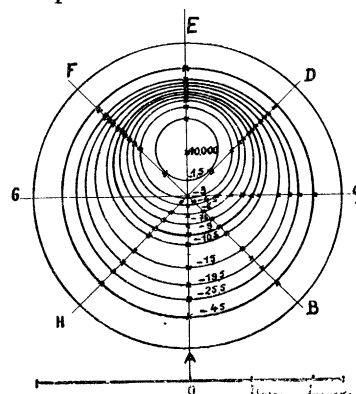


Fig. 4.

5. Variations relatives du courant dans l'électro-aimant et du champ magnétique dans l'entrefer. — Nous avons mesuré le champ magnétique dans l'entrefer pour différents courants d'excitation de l'électro-aimant au voisinage de la valeur de régime. La mesure du champ a été faite par la méthode d'induction et le courant a été mesuré au potentiomètre. Nous avons trouvé dans ces conditions que :

$$\frac{d\mathcal{E}}{dI} : \frac{dI}{I} = 0,2.$$

Cela signifie que pour maintenir le champ magnétique constant en moyenne au dix-millième dans l'entrefer, il suffit que les variations du courant dans l'électro-aimant ne dépassent pas un demi-millième, ce qui est relativement facile à réaliser.

I. Méthode électromagnétique.

6. Rappelons brièvement le principe de la balance de M. Cotton ⁽¹⁾ L'arc métallique conducteur ABCD (fig. 5) est formé de deux arcs de cercle concentriques et de deux éléments rectilignes AB et CD. L'élément AB est placé dans le champ à mesurer. Le courant est amené à l'arc suivant OE par des conducteurs non représentés

⁽¹⁾ Voir également A. COTTON et G. DUPOUY. *Comptes Rendus du Congrès International d'Electricité*, Paris 1932. Gauthier-Villars édit. Vol. III, p. 207.

sur la figure; nous supposons que le champ magnétique dans cette région, ainsi qu'à l'endroit où se trouve placé l'élément supérieur CD, est négligeable. On équilibre l'action de la force électromagnétique f agissant sur AB par celle de poids mg placés sur un plateau à l'extrémité d'un bras du levier OP. L'ensemble est mobile autour d'un axe O perpendiculaire au plan de la figure.

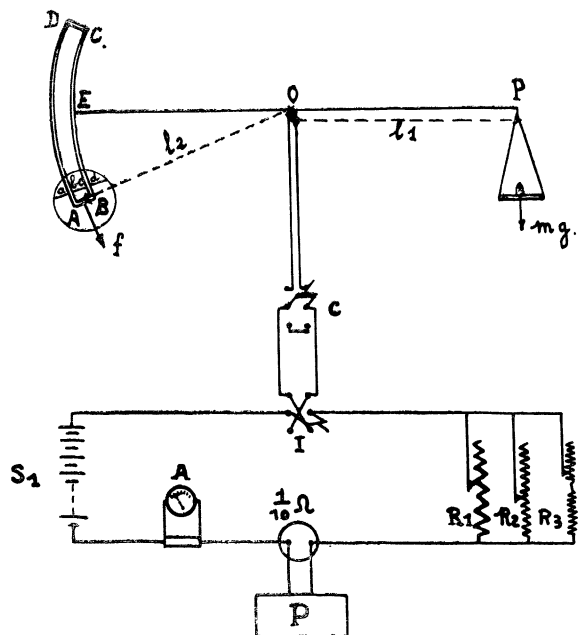


Fig. 5.

Supposons que le champ magnétique à mesurer \mathcal{H} soit normal à l'élément AB. Désignons en outre par e la longueur de l'arc AB, par l_2 le bras de levier de la force électromagnétique, par l_1 la distance OP et par i le courant qui passe dans la balance au moment de l'équilibre; la valeur du champ à mesurer est alors donnée par l'expression :

$$\mathcal{H} = k \cdot \frac{m}{i}$$

en posant :

$$k = \frac{g \cdot l_1}{e \cdot l_2}$$

Nous appellerons « k » la constante de la balance en un lieu donné.

La balance qui nous a servi dans presque toutes ces mesures ⁽¹⁾, a été construite par Weber à Zurich. Elle a été étudiée avec soin par M. A. Bonhoure, Assistant au Bureau International des Poids et Mesures, qui

⁽¹⁾ Nous avons également utilisé une balance du modèle de P. Sève construite par Pellin. Cette balance, d'un emploi plus commode que la précédente, n'était pas en assez bon état quand nous avons commencé ces mesures. Nous l'avons depuis sensiblement améliorée; mais les mesures géométriques que nous avons effectuées sur cet instrument par nos propres moyens ne sont pas assez précises: il n'y a aucun doute qu'on pourra les améliorer. Nous ne parlerons donc pas, pour le moment, de ces mesures.

nous a fourni sur cet instrument un dossier très complet. Nous pouvons dire que les éléments géométriques qui entrent dans l'expression de la constante de la balance sont très bien connus et c'est cela qui nous a permis d'obtenir une bonne précision dans nos mesures. Nous prions le lecteur de vouloir bien se reporter pour toute cette partie du travail à l'article de M. Bonhoure ⁽¹⁾.

7. Valeur de l'accélération de la pesanteur à Bellevue. — Pour faire le calcul de la constante de la balance nous avons besoin de connaître la valeur de g à Bellevue. Nous avons utilisé pour cela les mesures que M. F. Holweck a faites récemment pour l'établissement du réseau gravimétrique français ⁽²⁾. Voici les valeurs indiquées pour Breteuil (Bureau International des poids et mesures) et pour l'Observatoire de Meudon.

Breteuil (altitude 70 m)	$g = 980,942$
Meudon (altitude 163 m)	$g = 980,948$

Nous avons admis pour la valeur de g à Bellevue (Laboratoire du Grand Electro-Aimant).

$$g = 980,93$$

8. Constante de la balance. — Dans la balance de Weber les conducteurs AD et BC (fig. 5) sont des tores à section rectangulaire. Nous les remplacerons dans les calculs par un fil infiniment fin qui passerait par le centre de gravité de leur section méridienne ⁽³⁾. Il en résulte que la « longueur utile » de l'élément AB est égale à :

$$e = ad - \frac{ab + ca}{2}.$$

Les différentes mesures dont il a été question plus haut permettent de connaître la valeur de e le long de l'arc à partir de la base AB. On trouve ainsi :

DISTANCES COMPTÉES À PARTIR DE LA BASE DE L'ARC	l
10 mm	20,147 mm
15	20,147
20	20,159
22,5	20,159
25	20,157
27,5	20,160
30	20,160
40	20,175

Nous avons pris *arbitrairement* pour e la valeur 20,159 mm qui correspond à peu près à la moyenne des nombres précédents, étant entendu qu'il sera néces-

⁽¹⁾ Cet article paraîtra prochainement.

⁽²⁾ F. HOLWECK. *C. R.*, 1933, 196, p. 44.

⁽³⁾ Cette hypothèse sera justifiée un peu plus loin, p. 127.

saire de tenir compte de ses variations le long de l'arc (voir p. 132).

Dans ces conditions le bras de la force électromagnétique étant de :

$$l_2 = 25,033 \text{ cm},$$

on en tire pour la valeur de la constante de la balance :

$$k = 486,20$$

9. Influence de la courbure des conducteurs.

— Nous allons faire le calcul correct du couple électromagnétique exercé sur la balance en tenant compte de l'influence que la courbure des conducteurs peut avoir sur la répartition des lignes de courant ⁽¹⁾.

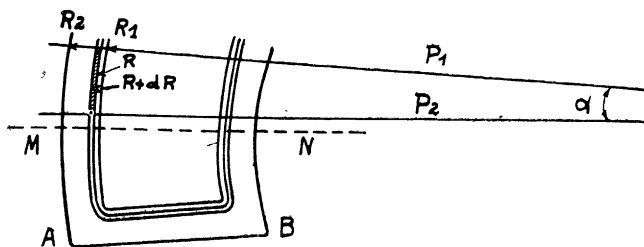


Fig. 6.

Nous admettons, par suite de la symétrie de l'arc, que le long de celui-ci la répartition du courant se fait de telle façon que les lignes de courant sont des cercles concentriques aux arcs ; par conséquent les surfaces équipotentiels sont des plans passant par l'axe de rotation. Il est très vraisemblable que cela a lieu en effet lorsque la distance du point considéré à la partie rectiligne est de l'ordre de quelques épaisseurs du conducteur (par exemple jusqu'en MN sur la figure 6). Pourvu que le champ magnétique soit uniforme jusque-là — et cette condition était remplie dans les mesures faites avec les pièces polaires cylindriques — c'est uniquement cette répartition qui compte pour le calcul de l'action magnétique,

Considérons une portion d'arc (l'arc extérieur, par exemple, fig. 6) de rayons R_1 et R_2 comprise entre deux plans équipotentiels P_1 et P_2 faisant entre eux l'angle α et correspondant à une différence de potentiel de V volts. Soit un filet compris entre les rayons R et $R + dR$ et d'épaisseur x perpendiculairement au plan de la figure ; il est parcouru par un courant di . Si ρ désigne la résistivité du métal la résistance de ce filet est :

$$\rho \frac{R\alpha}{x dR},$$

par suite :

$$di = \frac{Vx}{\rho\alpha} \frac{dR}{R} \quad (5)$$

d'où pour le courant total :

$$i = \frac{Vx}{\rho\alpha} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (6)$$

⁽¹⁾ La démonstration qui suit est due à M. P. ŠEVČ.

Imaginons que le filet de courant passe dans la partie rectiligne AB — dirigée suivant un rayon ⁽¹⁾ — et se prolonge jusqu'au couteau central de la balance en restant tout entier dans un champ magnétique uniforme \mathcal{H} . Il est soumis à un couple élémentaire :

$$dC = \mathcal{H} \frac{R^2}{2} di.$$

Le couple résultant sur le conducteur tout entier est dès lors

$$C = \int \mathcal{H} \frac{R^2}{2} di = \frac{Vx}{2\rho\alpha} \mathcal{H} \int_{R_1}^{R_2} R dR$$

d'où en éliminant $\frac{Vx}{\rho\alpha}$

$$C = \frac{\mathcal{H}i}{4} \frac{R_2^2 - R_1^2}{\log \frac{R_2}{R_1}} \quad (7)$$

On peut poser, comme R_1 et R_2 sont très voisins :

$$\frac{R_2}{R_1} = 1 + \epsilon$$

d'où :

$$C = \frac{\mathcal{H}i}{4} \frac{R_2^2 - R_1^2}{\epsilon - \frac{\epsilon^2}{2}} \quad (8)$$

(Nous avons négligé au dénominateur $\frac{\epsilon^3}{3}$ devant ϵ dans le développement de $\log(1+\epsilon)$: ϵ est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-3}$)

On fait un calcul analogue pour le second conducteur, de rayons R'_1 et R'_2 ($\frac{R'_2}{R'_1} = 1 + \epsilon'$) et l'on a pour l'expression du moment de la force électromagnétique agissant réellement sur la balance :

$$M = \frac{\mathcal{H}i}{4} \left(\frac{R_2^2 - R_1^2}{\epsilon - \frac{\epsilon^2}{2}} - \frac{R_2'^2 - R_1'^2}{\epsilon' - \frac{\epsilon'^2}{2}} \right) \quad (9)$$

Le calcul, conduit de cette façon dans le cas de notre balance, fournit un résultat identique à celui que l'on obtient par la méthode ordinaire. L'erreur est bien inférieure au dix-millième ⁽²⁾.

⁽¹⁾ On pourrait supposer d'ailleurs un parcours sinueux quelconque ; en considérant sa projection suivant un rayon, le résultat reste identique.

⁽²⁾ On peut d'ailleurs, sans faire le calcul complet du couple, M, se rendre compte très simplement de ce qui précède. Si l'on admet comme d'habitude une répartition uniforme de courant correspondant à une intensité moyenne \bar{i} dans le conducteur, au lieu de la formule (6) on a :

$$\bar{i} = \frac{Vx}{\rho\alpha} \frac{2(R_2 - R_1)}{R_1 + R_2}.$$

Ou en posant comme précédemment $\frac{R_2}{R_1} = 1 + \epsilon$

$$\bar{i} = \frac{Vx}{\rho\alpha} \left(\epsilon - \frac{\epsilon^2}{2} \right)$$

formule qui est identique à la formule (6) dans la mesure où les dimensions géométriques des arcs permettent de limiter au second terme de développement de $\log(1 + \epsilon)$.

Ainsi, lorsque la partie des conducteurs circulaires qui est au voisinage immédiat de l'élément rectiligne se trouve tout entière dans un champ uniforme on peut, sans erreur appréciable, remplacer dans les calculs ces conducteurs circulaires par un fil infiniment fin passant par le centre de gravité de leur section méridienne.

10. Dispositif expérimental. — La figure 5 représente le circuit de mesures de la balance. Celle-ci est alimentée par une batterie d'accumulateurs de grande capacité S_1 indépendante et isolée sur des porcelaines. Le courant passant dans la balance est approximativement repéré par un ampèremètre A ; on le règle par un jeu de trois résistances variables R_1, R_2, R_3 , montées en parallèle. Le courant de l'ordre de 10 ampères traverse une résistance de $1/10$ d'ohm et produit entre les extrémités de cette résistance une différence de potentiel que l'on mesure par comparaison avec la force électromotrice d'un élément Weston par l'intermédiaire d'un potentiomètre de Tinsley P. Un inverseur I permet de changer à volonté le sens du courant dans la balance. Afin d'obtenir un courant bien stable au moment de la mesure on ferme le circuit environ une heure avant les expériences de sorte que les résistances R_1, R_2, R_3 , et le $1/10$ d'ohm prennent alors une valeur fixe de régime. Pendant tout ce temps la balance est mise hors circuit au moyen du commutateur bipolaire C .

Le dixième d'ohm que nous avons utilisé au cours de ces mesures provient de la maison Tinsley.

La valeur de la résistance a été déterminée par les soins du National Physical Laboratory de Londres (N. P. L.); elle est donnée pour diverses valeurs du courant et à différentes températures. L'étalonnage a été repris à Paris à la fin du travail par le Laboratoire Central d'Electricité (L. C. E.). Les mesures s'accordent entre elles à quelques cent-millièmes près.

11. Marche d'une expérience. — La technique de mesure que nous avons utilisée est celle que P. Sève a décrite dans son travail sur la mesure du coefficient d'aimantation de l'eau⁽¹⁾. On opère de la façon suivante. Aucun courant ne passant dans la balance, on met sur le plateau une masse m ; on règle la balance à l'équilibre au moyen de contrepoids appropriés. On agit sur les butoirs qui limitent la course du fléau de telle sorte que le déplacement de l'aiguille soit de 1 mm environ.

On enlève la masse m : dans ces conditions la balance appuie sur le butoir supérieur; on lance dans la balance un courant de sens convenable que l'on fait croître jusqu'à ce que le fléau quitte le butoir supérieur. Soit i_1 sa valeur à ce moment là. On place alors sur le plateau une masse $2m$ et on envoie en sens contraire un courant que l'on fait progressivement décroître: soit i_2 sa valeur au moment où le fléau quitte le même butoir que précédemment.

Au moment où le fléau décolle, la force électroma-

gnétique a respectivement pour valeur $\mathcal{H} i_1 e l_2$ et $\mathcal{H} i_2 e l_2$. On a donc :

$$\mathcal{H} (i_1 + i_2) e l_2 = 2 m g l_1.$$

Nous opérons en croisant les mesures de champ par l'une et l'autre des deux méthodes et c'est toujours dans le même champ, maintenu aussi constant que possible, que nous avons fait les deux mesures en commençant tantôt par l'une, tantôt par l'autre.

Dans nos mesures trois expérimentateurs s'occupent des différentes parties du circuit; l'un d'eux surveille et règle le courant dans l'électro-aimant; le second manœuvre les rhéostats qui font varier le courant dans la balance et indique le moment où le fléau quitte le butoir contre lequel il était appuyé; le troisième enfin fait les mesures au potentiomètre. La personne qui s'occupe de la balance n'est pas la même dans toutes les mesures; nous avons successivement mis à contribution trois travailleurs du Laboratoire MM. Schérer, Vaudet et Tsai qui nous ont très aimablement aidé à plusieurs reprises et que nous remercions ici: les résultats des différentes séries de mesures ne présentent aucun écart systématique.

II. Méthode d'induction.

Rappelons brièvement la technique que nous avons utilisée. Une bobine de surface connue est placée dans le champ à mesurer: le plan de ses spires est perpendiculaire aux lignes de force. Le circuit de cette bobine comprend, en série, le secondaire d'une inductance mutuelle étalon et un fluxmètre servant d'appareil de zéro.

On retire la bobine du champ⁽¹⁾ et en même temps on inverse le courant i qui passe dans le primaire de l'inductance. Les choses ont été réglées de telle sorte que les variations de flux qui se produisent respectivement à travers la bobine et le secondaire de l'inductance soient opposées. Nous allons indiquer tout d'abord les caractéristiques des différents appareils que nous avons employés.

12. Bobines étalonnées. — Nous avons successivement utilisé deux bobines. Chacune d'elles est constituée par un disque de pyrex de 2 cm de diamètre environ et de 7 mm d'épaisseur. Les joues de la bobine consistent en deux rondelles de verre de 0,5 mm d'épaisseur.

La bobine est sertie dans un manche, également en pyrex, où elle est immobilisée par de l'arcanson collé sur le pourtour des joues.

Les mesures relatives à ces bobines ont été faites par les soins du Bureau International des poids et mesures.

Le diamètre de chacune d'elles a été mesuré suivant trois directions à 60° l'une de l'autre. Les résultats sont les suivants :

⁽¹⁾ Les entrefers dans lesquels nous avons fait les mesures ne permettaient pas de retourner la bobine face pour face, ce qui eût été évidemment préférable.

⁽¹⁾ P. Sève. *Loc. cit.*

	Bobine « B »	Bobine « C »
diamètre 11'	19,836 ^μ	19,838 ^μ
— 22'	19,836 ^μ	19,834 ^μ
— 33'	19,836 ^μ	19,833 ^μ

La bobine « B » est donc remarquablement de révolution, la bobine « C » l'est un peu moins. Pour chacune d'elles, les mesures faites à l'optimètre Zeiss, suivant trois diamètres au voisinage de chacune des joues ont montré que les bobines sont légèrement coniques et que quand on passe d'une joue à l'autre, la différence de deux diamètres correspondants est de 2^μ.

L'enroulement est fait d'une seule couche de fil de cuivre isolé à l'émail. Les fils en quittant la bobine sont soigneusement torsadés afin d'éviter les surfaces parasites et logés dans une rainure creusée dans le manche. Ces fils sont soudés à leur extrémité sur deux petites plaques de cuivre connectées elles-mêmes par soudure aux fils du circuit principal.

Nous nous sommes assurés que le fil des bobines est diamagnétique en le suspendant au moyen d'un montage approprié entre les pôles d'un fort électro-aimant. Son diamètre mesuré successivement sous les efforts de 200 gr sur deux millimètres de fil et de 1 100 gr sur cinq millimètres de fil, a été trouvé de 134^μ et 132^μ. Nous avons adopté pour le fil enroulé sur les bobines 133^μ.

Nous en déduisons pour la surface de chaque bobine :

Bobine « B »	41 spires	$S = 128,39 \text{ cm}^2$
Bobine « C »	40 spires	$S = 125,24 \text{ cm}^2$

à 19°2 C. Nous pensons que ces surfaces sont déterminées, avec une précision de 1 à 2 dix-millièmes.

13. Inductance mutuelle étalon. — Nous nous sommes successivement servis de deux inductances mutuelles étalonnées par le Laboratoire Central d'Electricité.

Celle qui a été utilisée dans la plupart des mesures est constituée par deux bobines coaxiales enroulées sur un cylindre de marbre blanc.

La valeur de l'inductance mutuelle de cette bobine, calculée au Laboratoire Central d'Electricité, est de 61,37 millihenrys absolus. Cette inductance a été comparée à plusieurs reprises, soit directement, soit indirectement avec les étalons du *National Physical Laboratory* calculés également en fonction de leurs dimensions géométriques. Les résultats concordent à un dix-millième près.

Remarquons qu'en général le Laboratoire Central d'Electricité utilise cette bobine en lui attribuant la valeur 61,34 millihenrys internationaux, valeur déduite de la valeur absolue en admettant que l'ohm international est supérieur de cinq dix-millièmes à l'ohm absolu. Nous ne pouvons que regretter cet emploi du henry international qui peut, dans certains cas, être une importante cause d'erreurs pour les physiciens.

Nous avons également employé une deuxième induc-

tance, moins bien déterminée, il est vrai, que la première, et qui n'a servi que pour les essais ou pour des comparaisons.

14. Ohm étalon. — Nous avons eu à notre disposition un ohm du *National Physical Laboratory*. Cet ohm est plongé dans un bain d'huile qui assure l'homogénéité de température dans toute sa masse. Il a été étalonné par le L. C. E. à deux reprises, avant et après les mesures; voici sa valeur exprimée en ohms L.C.E. (1).
 $R = 0,99988 [1 + 1,6 \times 10^{-5} (t - 20)]$ à 1×10^{-5} près.

15. Mesure du courant passant dans le primaire de l'inductance. — Ce courant est mesuré par la méthode potentiométrique : on compare la différence de potentiel qu'il produit aux extrémités de l'ohm à la force électromotrice de l'élément Weston par l'intermédiaire d'un potentiomètre de Tinsley.

Notre élément Weston a été mesuré à différentes reprises.

Voici sa valeur en volts L. C. E. au début et à la fin de notre travail

1,01823 V à 20° C
1,01828 V —

16. Fluxmètre. — Le fluxmètre dont nous nous sommes servis est du type Grassot à suspension par fil de soie; il est muni d'un miroir de 2 mètres de rayon de courbure. De grandes précautions d'isolement sont prises pour tout le circuit dans lequel il se trouve placé.

La compensation des flux est telle que le déplacement total du spot pendant la manœuvre qui consiste à extraire la bobine du champ magnétique et à inverser le courant dans le primaire de l'inductance, ne dépasse pas quelques centimètres.

Dans les conditions de nos expériences, une variation du champ dans l'entrefer de 2,6 gauss produit un déplacement du spot de 1 mm sur la règle.

17. Circuit de mesure. — La bobine étalon B (fig. 7) est connectée en série avec le fluxmètre F et le secondaire M_2 de l'inductance M; ce circuit comprend en outre une bobine peu résistante b qui peut se déplacer d'un mouvement de translation sur un barreau cylindrique aimanté aa' : cela permet d'amener le spot du fluxmètre à un endroit voulu sur la règle, ce qui est très commode au cours des mesures. Tout ce circuit est en fil torsadé, de façon à éviter des inductances parasites.

(1) Nous avons adopté les unités électriques du L. C. E. On sait que les étalons des différents laboratoires nationaux de mesures : *Bureau of Standards*, P. T. R., N. P. L., L. C. E., etc., ne sont pas identiques; cela n'a aucun inconvénient pour nous à condition que dans chacun de ces laboratoires on aboutisse à un système cohérent d'unités, ce qui est bien le cas; en particulier on a :

$$\frac{\text{volt L. C. E.}}{\text{ohm L. C. E.}} = \text{ampère vrai};$$

c'est la seule chose importante pour la suite de nos mesures.

Le circuit du primaire M_1 de l'inductance mutuelle est alimenté par une batterie indépendante isolée S_1 , le courant passe successivement dans l'ohm étalon Ω , dans un ampèremètre A et dans une série de trois rhéostats R_1 R_2 R_3 montés en parallèle et permettant un réglage très fin; on peut changer à volonté le sens de courant dans le primaire en manœuvrant l'inverseur I .

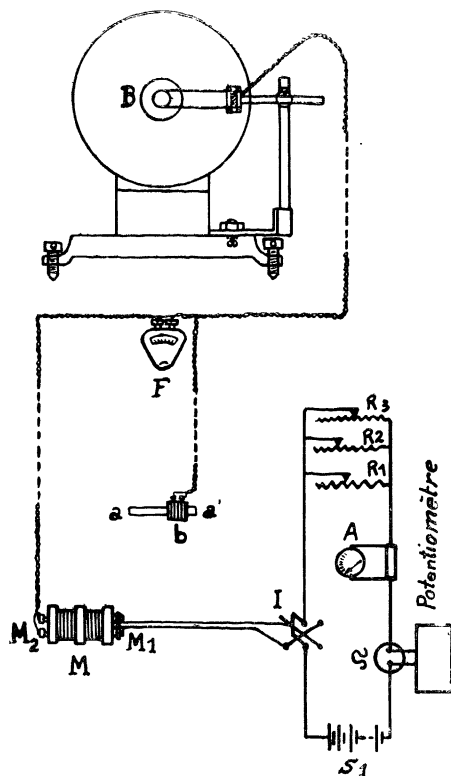


Fig. 7.

18. Dispositif de manœuvre. — La bobine B (fig. 8) est maintenue par une barette de laiton contre une plaque p fixée à l'une des extrémités d'une tige de laiton T . Celle-ci passe à frottement doux dans un arbre en laiton A mobile autour d'un axe aa' . La tige portant la bobine est isolée de l'arbre A par un manchon en ébonite m .

Un collier C bloqué sur l'arbre au moyen d'une vis v porte un ergot b qui dans la rotation vient en contact avec une butée fixe b' et permet de régler la position de la bobine en hauteur.

Pour pouvoir à un instant convenable inverser le courant dans le primaire de l'inductance, on utilise le dispositif suivant. Une bague E en ébonite est bloquée sur l'arbre A par une vis v' ; une borne b_1 est reliée à un contact c' en laiton qui est entraîné avec la bague E lors de la rotation de la bobine; sur la lame élastique L qui s'appuie sur le pourtour de la bague E est soudée une deuxième borne b_2 , l'ensemble est isolé au moyen d'une cale e en ébonite. Les bornes b_1 et b_2 sont connectées à un circuit qui comprend une petite bat-

terie d'accumulateurs et un relai destiné à manœuvrer l'inverseur.

Enfin l'arbre A se prolonge par une tige T' munie d'un bouton moleté V qui sert à faire tourner tout le système. Cet ensemble est fixé sur deux montants verticaux P_1 P_2 , fixés sur une plaque P directement maintenue sur l'électro-aimant. Différents dispositifs que nous ne décrirons pas permettent d'orienter convenablement la bobine par rapport aux pièces polaires et de la placer à égale distance de chacune d'elles.

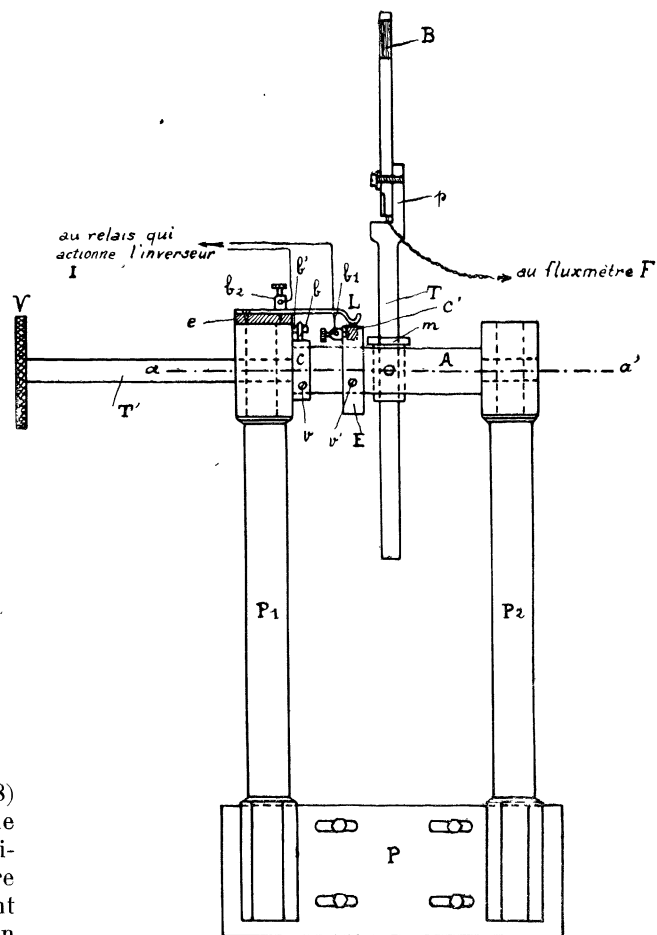


Fig. 8.

Le réglage de la bobine se fait comme celui de la balance en contrôlant sa position au moyen d'une lunette munie d'un oculaire micrométrique.

Nous avons pris concernant la position et l'orientation de l'inductance les précautions suivantes. L'inductance est placée aussi loin que possible de l'électro-aimant de telle façon que des variations même importantes du courant dans l'électro-aimant ne produisent aucune variation de flux parasite à travers la bobine du secondaire.

D'autre part les murs de la salle où nous opérons contenant quelques poutres de fer, nous nous sommes

inquiétés de savoir si leur présence ne pourrait avoir quelque répercussion sur la valeur de l'inductance. Nous avons donc, dans le courant des mesures, orienté celle-ci de façon que son axe occupe successivement trois positions rectangulaires entre elles : nous n'avons pas constaté dans les résultats de variations systématiques liées à ces différentes orientations.

III. Résultats.

Nos mesures ont porté sur deux champs magnétiques de valeurs nettement différentes :

$$\mathcal{H}_1 = 8\,350 \text{ gauss}$$

et

$$\mathcal{H}_2 = 20\,750 \text{ gauss environ.}$$

Un certain nombre de corrections doivent être apportées au résultat brut des mesures ; nous indiquerons tout d'abord comment nous avons conduit le calcul de ces différentes corrections, ainsi que l'ordre de grandeur de celles-ci (Les indices (1) et (2) utilisés ci-dessous se rapportent respectivement aux corrections affectant les champs \mathcal{H}_1 et \mathcal{H}_2).

a) **Correction due à l'action du champ magnétique sur la matière même de l'arc de la balance.** — On effectue automatiquement cette correction par le procédé même de mesure. La force qui s'exerce sur la matière de l'arc de la balance, en l'absence de tout courant dans cet arc, est de sens invariable : elle s'ajoute donc à la force électromagnétique puis se retranche de celle-ci suivant le sens du courant dans l'arc et au total on n'a pas à en tenir compte (1).

b) **Mesure du champ qui agit sur l'élément supérieur de l'arc.** — Un champ magnétique non négligeable agit sur l'élément supérieur de l'arc ; on le mesure par la méthode d'induction avec la bobine « B » décrite plus haut et en se servant d'une inductance de 4 millihenrys ; on repère avec un dispositif approprié le centre de l'élément d'arc et on met à sa place le centre de la bobine. On fait plusieurs mesures indépendantes en recommençant chaque fois les réglages. Les valeurs de ce champ parasite sont :

$$h_1 = 66,6 \pm 0,5 \text{ gauss}$$

$$h_2 = 39,1 \pm 0,5 \text{ gauss.}$$

Le sens de ce champ est dans chaque cas le même que celui du champ à mesurer.

c) **Mesure de la force agissant sur les amenées de courant.** — De même, un champ magnétique règne le long des conducteurs qui amènent le courant à l'arc ; il crée des forces appliquées sur ces conducteurs ; pour mesurer leur résultante on supprime la connexion entre l'arc et les amenées de courant ; on réunit celles-

ci entre elles dans la position exacte qu'elles occupent lors des mesures par une petite bande de cuivre rouge de $1/10^e$ de millimètre d'épaisseur (1 ; cette bande est pincée par serrage sous l'un des conducteurs et soudée sur l'autre ; elle est, en outre, isolée de l'arc à l'un des bouts par deux petites bandes minces de mica.

On équilibre alors la balance en dehors du champ et sans qu'aucun courant passe dans les conducteurs ; puis on met en place la balance dans le champ et on lance dans les conducteurs le courant qui les traversait lors de la mesure proprement dite. On réalise de nouveau l'équilibre, pour chaque sens du courant, au moyen de surcharges convenables.

Tout se passe, en définitive, comme si le poids réellement appliqué était augmenté dans chaque cas de :

$$m_1 = 0,302 \text{ gr} \pm 0,005 \text{ gr}^{(2)}$$

et

$$m_2 = 0,142 \text{ gr} \pm 0,005 \text{ gr.}$$

les poids correspondants dans la mesure de champ sont :

$$M_1 = 40 \text{ gr}$$

et

$$M_2 = 88 \text{ gr.}$$

d) **Correction due à une augmentation de l'épaisseur de l'arc aux points d'attache des amenées de courant.** — Les bandes de cuivre rouge qui amènent le courant dans l'arc sont fixées par une vis sur une partie plus épaisse AA' de l'arc située vers le milieu de celui-ci (fig. 9). Dans les régions A et A' existe un

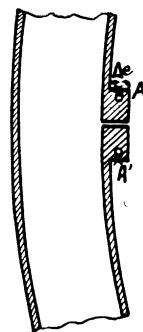


Fig. 9.

champ magnétique dont nous désignerons par h et h' l'intensité. Il est facile de voir que si Δe représente l'accroissement de l'épaisseur utile de l'arc (Δe est constant de A en A'), i le courant qui passe dans l'arc, la présence de cet épaississement a pour résultat de créer une force f , s'exerçant dans le sens de celle qui est due au champ à mesurer et qui a pour valeur :

(1) Il n'y a pas de force parasite sur cette bande de cuivre, car celle-ci est traversée par un courant parallèle au champ.

(2) Ces nombres sont des valeurs moyennes. Ils ont varié légèrement d'une série d'expériences à l'autre : ils servent seulement à fixer un ordre de grandeur.

(1) L'existence de cette force a pour seule conséquence que les deux courants de sens contraire qui provoquent successivement le décollage du fléau sont légèrement différents.

$$f = (h - h') i \cdot \Delta e.$$

Nous avons mesuré h et h' par la méthode d'induction en utilisant une petite bobine de 5 mm de diamètre seulement : le centre de cette bobine occupait successivement les positions A et A'.

La force f correspond, avec les courants passant dans l'arc dans chaque expérience, à des poids de 0,086 g et 0,051 g mis sur le plateau de la balance.

e) **Correction due à une légère variation de champ le long de l'élément de courant de la balance.** — Si l'on désigne par \mathcal{H}_0 le champ au centre de l'élément rectiligne de courant, par \mathcal{H}_x sa valeur à une distance x du centre, la force agissant à cet endroit sur l'élément dx a pour valeur

$$df = i \mathcal{H}_x dx$$

d'où

$$F = i \int_{-\frac{e}{2}}^{+\frac{e}{2}} \mathcal{H}_x dx = \mathcal{H}_0 ie \left(1 + \frac{1}{e} \int_{-\frac{e}{2}}^{+\frac{e}{2}} \frac{\mathcal{H}_x - \mathcal{H}_0}{\mathcal{H}_0} dx \right).$$

On a directement, par les diagrammes des figures 3 et 4, la quantité $\frac{\mathcal{H}_x - \mathcal{H}_0}{\mathcal{H}_0}$ en chaque point du champ et il suffit de faire la somme tout le long de l'élément de courant. Cela donne pour nos mesures

$$F_1 = \mathcal{H}_0 ie (1 + 0,7 \cdot 10^{-4})$$

et

$$F_2 = \mathcal{H}_0 ie (1 - 2,3 \cdot 10^{-4}).$$

f) **Correction analogue due à une légère variation de flux d'un point à l'autre de la bobine de mesure.** — Avec les notations précédentes, le flux réel à travers la bobine (mesuré par la méthode d'induction) a pour expression :

$$\Phi = \int_0^S \mathcal{H}_x dS = \mathcal{H}_0 S \left(1 + \frac{1}{S} \int_0^S \frac{\mathcal{H}_x - \mathcal{H}_0}{\mathcal{H}_0} dS \right).$$

Pour calculer le terme qui figure dans la parenthèse, on découpe en zones la surface de la bobine et on fait la somme des flux partiels évalués au moyen des diagrammes. Nous avons ainsi obtenu :

$$\Phi_1 = \mathcal{H}_0 S (1 + 1 \cdot 10^{-4})$$

$$\Phi_2 = \mathcal{H}_0 S (1 - 3,2 \cdot 10^{-4}).$$

g) Le tableau de la page 126 nous montre que la distance moyenne e des deux conducteurs circulaires de l'arc varie légèrement d'un point à l'autre. Nous avons évalué de la manière suivante la correction qui en résulte.

Soit \mathcal{H}_z le champ dans la région occupée par l'arc, à la distance z de la base, la force agissant réellement sur la balance est :

$$F = \mathcal{H}_0 ie + \mathcal{H}_z i(\Delta e),$$

$$\text{ou : } F = \mathcal{H}_0 ie \left[1 + \frac{\mathcal{H}_z}{\mathcal{H}_0} \frac{(\Delta e)_z}{e} \right].$$

Nous avons relevé la topographie du champ magné-

tique tout le long de l'arc et formé en chaque point la quantité $\frac{\mathcal{H}_z}{\mathcal{H}_0} \frac{(\Delta e)_z}{e}$; cette quantité passe par un maximum dans la région où l'arc sort de l'entrefer; elle tombe à la valeur 0 quand on s'éloigne convenablement des pôles.

Cela conduit aux corrections suivantes :

$$F_1 = \mathcal{H}_0 ie (1 + 5 \cdot 10^{-4})$$

$$F_2 = \mathcal{H}_0 ie (1 - 3 \cdot 10^{-4}).$$

h) **Étalonnage des poids qui ont servi dans les mesures.** — Nous avons comparé entre eux les poids dont nous nous sommes servis, par la méthode habituelle.

D'autre part M. Maudet a bien voulu étalonner deux de ces poids au Bureau International des Poids et Mesures (Pavillon de Breteuil), nous l'en remercions bien vivement. Voici le résultat de cet étalonnage :

Poids marqué	20 gr	Poids réel	19,9999 gr
—	50 gr	—	49,9999 gr

Il va sans dire qu'il est nécessaire dans les mesures de faire la correction de poussée de l'air.

19. **Résultats.** — Nous avons fait 74 mesures de champs magnétiques au moyen de la balance, pour chaque sens du courant dans l'arc et 68 mesures au moyen de la méthode d'induction. Elles sont réparties en deux groupes formant respectivement 9 et 6 séries distinctes. Toutes les mesures d'une même série ont été faites par les deux méthodes en croisant les mesures et dans le même champ magnétique. Nous n'avons jamais coupé ni inversé le champ magnétique au cours d'une même série de mesures car, malgré les précautions prises pour faire parcourir au fer des cycles d'aimantation bien définis, on n'est jamais sûr, d'une mesure à l'autre, d'obtenir le même champ magnétique après l'une de ces opérations.

Les résultats du premier groupe de mesures sont condensés dans les tableaux ci-dessous. Dans la dernière colonne nous avons fait figurer le rapport du nombre obtenu dans la mesure faite par la méthode d'induction à celui qui est donné par la balance.

NUMÉRO DE LA MESURE	NOMBRE DE MESURES		\mathcal{H} (balance)	\mathcal{H} (bobine)	$\frac{\mathcal{H}(\text{bobine})}{\mathcal{H}(\text{balance})}$
	balance	bobine			
1	5	7	8 344,8	8 345,1	1,0000 ₄
2	6	5	8 345,9	8 344,1	0,9997 ₈
3	5	4	8 347,3	8 347,	1,0000 ₁
4	5	4	8 348,0	8 346,4	0,9998 ₆
5	5	4	8 346,1	8 346,8	1,0000 ₂

D'où

$$\frac{\mathcal{H}(\text{bobine})}{\mathcal{H}(\text{balance})} (\text{moyenne}) = 0,9999_4.$$

Les mesures suivantes se rapportent au champ obtenu avec la deuxième paire de pièces polaires.

NUMÉRO DE LA MESURE	NOMBRE DE MESURES		\mathcal{H} (balance)	\mathcal{H} (bobine)	$\frac{\mathcal{H}(\text{bobine})}{\mathcal{H}(\text{balance})}$
	balance	bobine			
6	5	5	20 703,0	20 705,7	1,0001 ₃
7	5	5	20 707,2	20 707,7	1,0000 ₂
8	5	4	20 703,4	20 710,9	1,0003 ₆
9	4	4	20 704,2	20 706,8	1,0001 ₂

$$\frac{\mathcal{H}(\text{bobine})}{\mathcal{H}(\text{balance})} (\text{moyenne}) : 1,0001_6.$$

Le système de fixation de l'arc de la balance au fléau de celle-ci étant initialement assez fragile nous avons craint qu'au cours des mesures le bras de levier de la force électromagnétique ait pu légèrement varier. Nous avons donc démonté l'arc et consolidé sa liaison avec le fléau pour obtenir un assemblage plus solide.

A la suite de cette modification M. A. Bonhoure a bien voulu reprendre la mesure délicate du bras de levier de la force agissant sur l'arc. Les tâtonnements ayant pu cette fois être évités on a augmenté la précision des mesures dans cette détermination. La balance a été ramenée à Bellevue sans avoir été emballée de façon à supprimer toute cause de déformation.

Les mesures ont ensuite été reprises de nouveau et c'est donc à ce second groupe qu'il faut normalement accorder la préférence. Voici les résultats obtenus.

NUMÉRO DE LA MESURE	NOMBRE DE MESURES		\mathcal{H} (balance)	\mathcal{H} (bobine)	$\frac{\mathcal{H}(\text{bobine})}{\mathcal{H}(\text{balance})}$
	balance	bobine			
10	4	4	8 348,8	8 351,5	1,0003 ₂
11	5	4	8 352,8	8 355,0	1,0002 ₇
12	5	5	8 351,1	8 351,7	1,0000 ₇

$$\frac{\mathcal{H}(\text{bobine})}{\mathcal{H}(\text{balance})} (\text{moyenne}) = 1,0002_2.$$

Nous avons refait, de même, des mesures dans un champ plus intense qui nous ont donné les résultats suivants :

NUMÉRO DE LA MESURE	NOMBRE DE MESURES		\mathcal{H} (balance)	\mathcal{H} (bobine)	$\frac{\mathcal{H}(\text{bobine})}{\mathcal{H}(\text{balance})}$
	balance	bobine			
13	4	5	20 786,7	20 794,4	1,0003 ₇
14	4	4	20 792,6	20 808,8	1,0007 ₅
15	4	4	20 788,8	20 792,1	1,0001 ₆

$$\frac{\mathcal{H}(\text{bobine})}{\mathcal{H}(\text{balance})} (\text{moyenne}) = 1,0004_4.$$

Ces résultats appellent les remarques suivantes.

D'abord les rapports : $\frac{\mathcal{H}(\text{bobine})}{\mathcal{H}(\text{balance})}$ sont ici plus élevés en moyenne que ceux du premier groupe de mesures ; mais cela ne doit pas nous étonner d'après ce que nous avons dit et nous devons considérer comme plus correctes les mesures du second groupe, la constante géométrique de la balance étant à coup sûr mieux déterminée.

Une autre remarque c'est que systématiquement la moyenne de ces rapports est plus grande pour les mesures faites dans le champ de 20.750 gauss environ que pour celles portant sur le champ de 8 350 gauss environ.

Nous pensons que d'après des remarques déjà faites (p. 127) ce résultat est tout à fait normal. Le champ magnétique obtenu avec des pièces polaires tronconiques décroissant régulièrement à partir du centre de l'entrefer on doit dans le calcul de la constante de la balance tenir compte de la courbure des lignes de courant aux extrémités de l'élément rectiligne AB. (fig. 7). Il en résulte que la valeur admise e pour la longueur utile de l'élément de courant est un peu trop forte, ce qui explique les résultats ci-dessus. Il est bien difficile de faire la correction par le calcul. Un procédé plus sûr consisterait à déterminer la forme des surfaces équipotentiellles dans l'arc au voisinage de la région considérée : la chose serait facile, non pas sur l'arc lui-même de la balance mais sur un modèle agrandi. Nous nous proposons d'entreprendre cette vérification ; mais en raison même de cette petite correction éventuelle que nous n'avons pas pu faire nous devons provisoirement accorder la préférence aux nombres obtenus avec les pièces polaires cylindriques donnant un champ bien uniforme.

De toute façon les résultats actuels nous paraissent suffisamment précis pour que nous puissions en tirer les conclusions suivantes. *Nos mesures ne confirment pas l'existence d'un écart de 2 pour 1000 environ entre les résultats obtenus respectivement par la méthode électromagnétique et par la méthode d'induction. Elles indiquent au contraire un très bon accord entre ces deux méthodes.*

M. P. Sève avait le premier signalé l'écart en question : nous lui avons fait part de nos résultats. Il a bien voulu nous indiquer qu'il n'avait jamais considéré personnellement la concordance des écarts trouvés entre les deux méthodes avec ceux trouvés par M. A. Piccard que comme fortuite. D'autre part M. Foëx indique lui-même que ses mesures sont faites avec la précision de 1 à 2 pour 1000. En somme les mesures de MM. Sève et Foëx ont été faites avec une précision déjà grande (1 pour 1000 environ) mais ne permettant pas de considérer l'écart qui nous occupe comme existant réellement.

M. A. Piccard indiquait, par contre, qu'il pensait avoir atteint la précision du dix-millième dans ses propres mesures et dans ces conditions comme il avait retrouvé l'écart de 2 pour 1000 entre les deux méthodes il en avait logiquement conclu que la définition de l'ampère était légèrement défectueuse.

Cette différence ne provient certainement pas de l'étalon d'inductance mutuelle utilisé par MM. Piccard et Foëx; grâce à l'obligeance de M. Scherrer nous avons pu comparer cet étalon d'inductance à celui que nous avons utilisé. Nous avons constaté que la valeur attribuée par M. Foëx à cet étalon ne diffère que de deux dix-millièmes de celle que nous sommes amenés à lui attribuer. L'écart paraît donc plutôt provenir de la définition que ces auteurs avaient adoptée pour l'ampère.

20. Valeur de l'ampère international déduite de nos mesures. — Dans toutes nos expériences les courants mesurés au potentiomètre sont exprimés en prenant l'ampère international (L. C. E.) comme unité.

Il en résulte que si le rapport entre l'ampère international et l'ampère vrai s'écarte de l'unité cela se traduira (Remarque II, p. 124) par un écart double sur le rapport :

$$\frac{\mathcal{H}(\text{bobine})}{\mathcal{H}(\text{balance})}.$$

Nous avons donc d'après nos mesures la relation :

$$\begin{aligned} \frac{\text{ampère international (L. C. E.)}}{\text{ampère absolu}} &= \left| \frac{\mathcal{H}(\text{bobine})}{\mathcal{H}(\text{balance})} \right|^{-\frac{1}{2}} \\ &= |1,0002_2|^{-\frac{1}{2}} \\ \frac{\text{ampère international (L. C. E.)}}{\text{ampère absolu}} &= 0,9998_9. \end{aligned}$$

Nous avons déjà indiqué que dans un travail tout récent MM. Harvey, L. Curtis et Roger W. Curtis ont

repris avec beaucoup de soin la détermination absolue de l'ampère; leur résultat est le suivant :

$$\frac{\text{ampère international (B. S.)}}{\text{ampère absolu}} = 0,99992_8 \pm 2.10^{-5}.$$

Si l'on tient compte du léger écart qui existe entre l'ampère international (B. S.) et l'ampère international (L. C. E.) ⁽¹⁾ on obtient à partir du résultat du Bureau of Standards :

$$\frac{\text{ampère international (L. C. E.)}}{\text{ampère absolu}} = 0,99979_9 \pm 2.10^{-5}.$$

Notre détermination de l'ampère absolu s'accorde donc avec celle de MM. H. L. Curtis et R. W. Curtis au dix-millième près.

Cet accord — bien meilleur au surplus que ce que nous pouvions espérer d'après la précision de nos mesures (quelques dix-millièmes) — fournit un nouvel argument en faveur de nos conclusions.

Cela nous amène en terminant, à indiquer que la balance de Cotton nous paraît pouvoir être utilisée dès maintenant comme appareil absolu dans les déterminations précises de l'ampère. On peut en effet concevoir un modèle où l'arc aura été réalisé avec une perfection géométrique suffisante pour que la précision du dix-millième soit nettement dépassée dans les mesures : il suffirait de construire un arc tel que la longueur de son élément rectiligne soit franchement plus grande (10 centimètres par exemple). Cette balance serait alors utilisée en liaison avec un champ magnétique très uniforme fourni par un aimant permanent muni de larges pôles, comme il en existe à l'heure actuelle dans certains laboratoires.

⁽¹⁾ Le volt international (L. C. E.) est inférieur de 50.10^{-6} au volt international (B. S.) et l'ohm international (L. C. E.) est supérieur de 79.10^{-6} à l'ohm international (B. S.)