

COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ.

SESSION DE 1937.

PROCÈS-VERBAL DE LA SÉANCE,

RAPPORT ET ANNEXES

PRÉSIDENT
du Comité International des Poids et Mesures

A. DANJON.

LISTE DES MEMBRES
DU
COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ.

Président

R. VIEWEG, Vice-Président du Comité International des Poids et Mesures; Président de la Physikalisch-Technische Bundesanstalt, *Braunschweig*.

Membres

PHYSIKALISCH - TECHNISCHE BUNDESANSTALT, *Braunschweig*
(H. E. LINCKH, Directeur de l'Abteilung II de la P. T. B.;
E. BLECHSCHMIDT, Membre du Deutsches Amt für Mass
und Gewicht).

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS, *Washington 25, D. C.*
(J. L. THOMAS, Chief, Resistance and Reactance Section).

NATIONAL RESEARCH COUNCIL, *Ottawa* (S. KALRA, Division
of Applied Physics).

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS, *Paris*
(P. DE LA GORCE, Directeur-Adjoint du Laboratoire Central

des Industries Électriques, *Fontenay-aux-Roses*; R. HÉROU, Chef de Service au L. C. I. E.).

ELECTROTECHNICAL LABORATORY, *Tokyo* (M. NAITO, Associate Director).

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, *Teddington* (L. HARTSHORN, Senior Principal Scientific Officer; G. H. RAYNER, Principal Scientific Officer).

INSTITUT DE MÉTROLOGIE D. I. MENDÉLÉEV, *Leningrad* (E. CHRAMKOV, Chef du Service des Mesures électriques et magnétiques de l'I. M.).

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES, *Sèvres* (Ch. VOLET, Directeur).

C. BUDEANU, Membre de l'Académie R. P. R., *Bucuresti III*.

H. KÖNIG, Directeur du Bureau Fédéral des Poids et Mesures, *Berne*.

P. LOMBARDI, Membre de l'Istituto Elettrotecnico Nazionale « Galileo Ferraris », *Torino* (en remplacement de Mr SOMEDA).

V. YOVANOVITCH, Professeur à la Faculté Électrotechnique *Beograd*.

Invités

W. K. CLOTHIER, Electrotechnology Division, National Standards Laboratory, *Chippendale* (Australie).

J. TERRIEN, Sous-Directeur du Bureau International des Poids et Mesures, *Sèvres*.

ORDRE DU JOUR DE LA SESSION.

1. Nomination d'un Secrétaire et d'un Rapporteur.
 2. Rapports distribués.
 3. Comparaisons internationales de 1953 et de 1955.
 4. Comparaisons futures.
 5. Unification des unités électriques.
 6. *a.* Travaux sur les unités absolues.
b. Propositions sur la réalisation et la comparaison des unités électriques.
 7. Matériaux pour les étalons de résistance.
 8. Réalisation de résistances étalons en métaux purs, compensées pour la température ou définies à la température d'un point fixe.
 9. Amélioration des installations du Bureau International.
 10. Questions diverses.
-

COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ.

8^e SESSION (1957)

PROCÈS-VERBAL

DE LA SÉANCE

TENUE AU BUREAU INTERNATIONAL.

Jeudi 6 juin 1957.

PRÉSIDENCE DE Mr R. VIEWEG.

La séance est ouverte à 15^h 5^m.

Sont présents : MM. VIEWEG, BLECHSCHMIDT, CHRAMKOV, DE LA GORCE, HARTSHORN, HÉROU, KALRA, KÖNIG, LINCKH, LOMBARDI, NAITO, RAYNER, THOMAS, VOLET, Membres du Comité Consultatif.

Assistent à la séance : Mr BOURDOUN, Membre du Comité International des Poids et Mesures.

MM. CLOTHIER, TERRIEN, invités.

Mr ALIANAKI, du Comité des Normes de l'U. R. S. S.; MM. A. BONHOURE, MOREAU, LECLERC, du Bureau International.

Excusés : MM. BUDEANU, YOVANOVITCH.

Mr le PRÉSIDENT souhaite la bienvenue aux Membres du Comité Consultatif, en particulier à Mr DE LA GORCE qui est l'un de nos plus anciens Collègues et à Mr KÖNIG qui assumait la présidence en 1952. Il transmet au Comité Consultatif les sentiments cordiaux de Mr PÉRARD, Directeur honoraire du

Bureau International, et de Mr JACOB, Président du Comité International de Métrologie Légale.

L'Ordre du Jour proposé, complété par le point 6 b, est approuvé. Pour les discussions, la langue officielle est le français, mais quelques traductions seront peut-être utiles en anglais; elles seront faites par MM. KÖNIG et TERRIEN.

Mr DE LA GORCE est désigné comme Rapporteur, et Mr TERRIEN comme Secrétaire.

Mr VOLET demande que soient signalées le plus tôt possible au Bureau International les erreurs que contiendraient les traductions en français des rapports qui ont été envoyés; d'importants documents japonais en langue anglaise, arrivés quelques jours avant la session, n'ont pu être traduits. Une Note de Mr BUDEANU sur l'*Unification des unités électriques et magnétiques* vient juste de nous parvenir, mais elle traite de la rationalisation des unités, question en dehors du programme de travail actuel de notre Comité Consultatif. Il est en outre d'usage, rappelle Mr VOLET, que seuls les rapports inédits soient publiés aux *Procès-Verbaux* du Comité, exception faite parfois de ceux qui ont paru en langue russe ou japonaise.

Mr le PRÉSIDENT remarque que l'ensemble des documents présentés est assez volumineux; il prie les auteurs d'essayer de condenser leurs rapports s'il y a lieu.

**Comparaisons internationales de 1953 et de 1955.
Unification des unités électriques.**

Les rapports du Bureau International sur ces comparaisons électriques ont été publiés aux *Procès-Verbaux du C. I. P. M.*, 24, 1954, p. 138 et 147; 25, 1956, p. 120 et 129.

Mr le PRÉSIDENT constate que les unités conservées dans les divers Laboratoires nationaux sont presque identiques, à l'exception de l'unité de résistance du Deutsches Amt für Mass und Gewicht et, à un moindre degré, de l'unité de force électromotrice de l'U. R. S. S.

Mr BLESCHMIDT annonce que, les difficultés dues à l'état de guerre ayant cessé, les étalons du D. A. M. G. sont devenus stables depuis 1950, et qu'une nouvelle valeur leur sera désormais

attribuée, afin qu'ils soient en accord avec l'ohm du Bureau International, ce qui supprimera la différence de 21.10^{-6} qui existe actuellement.

Mr HARTSHORN rappelle les conclusions des rapports qu'il a présentés (Annexes E 1 et E 2, p. E 21 et E 23); la situation est aussi satisfaisante qu'il est possible, les différences étant trop petites pour être contrôlables par des mesures absolues. Il estime préférable que les laboratoires continuent à conserver leurs unités jusqu'à ce qu'un changement général paraisse opportun.

Mr CHRAMKOV désire aussi que les valeurs actuelles des unités soient conservées; lorsque plusieurs déterminations absolues seront achevées, on discutera sur les changements qui seront rendus nécessaires.

Mr THOMAS révèle que son laboratoire a l'intention de proposer un alignement général des unités en 1959, époque logique avant la Conférence Générale de 1960.

Mr le PRÉSIDENT constate que le désir est général de conserver intactes les valeurs actuelles des unités jusqu'à ce que les résultats des nouvelles mesures absolues puissent être examinés, et que l'unification des unités électriques sur des valeurs améliorées est souhaitée pour 1959. Le changement annoncé par Mr BLESCHMIDT n'étant que la réparation d'un accident du temps de guerre, il n'est pas en contradiction avec les désirs précédents.

Comparaisons futures.

Mr VOLET rappelle que la périodicité de deux ans a été de règle pour les comparaisons électriques internationales jusqu'à aujourd'hui; on a pu ainsi constater l'excellente stabilité des étalons électriques. Il se demande s'il est justifié de conserver cette périodicité, qui expose les étalons voyageurs à certains risques et conduit à commencer une nouvelle comparaison avant même que les résultats de la précédente comparaison aient pu être examinés. De même, dans les premières années du Bureau International, on prévoyait la comparaison périodique des étalons du mètre et du kilogramme à des intervalles de 20 ans; or l'expérience a montré qu'on pouvait espacer ces comparaisons.

Mr le PRÉSIDENT considère que la période troublée d'après guerre est achevée, et que les comparaisons électriques de 1957-1958 pourraient être effectuées sans trop de hâte, leurs résultats devant être présentés à notre Comité à sa prochaine session de l'automne 1959 ou du printemps 1960.

Mr HARTSHORN convient qu'on peut espacer désormais les comparaisons internationales complètes; mais il reste utile que les étalons du Bureau soient comparés entre eux tous les deux ans.

Mr CHRAMKOV est aussi d'avis que l'état actuel des étalons autorise cet espacement.

Mr DE LA GORGE pense qu'avant l'ajustement des unités nationales envisagé pour 1959 à la suite des mesures absolues en cours, des comparaisons préalables seraient désirables.

Mr le PRÉSIDENT, ainsi que Mr VOLET, confirment qu'en dehors des comparaisons internationales, le Bureau International est toujours prêt à mesurer, par comparaison à ses étalons, les étalons de tout Laboratoire qui le désire, comme cela se produit fréquemment aussi pour les étalons de longueur et de masse.

La comparaison électrique internationale suivante aurait lieu après la Conférence Générale, par exemple en 1961.

Mr VOLET rappelle à cette occasion les formalités douanières à observer lors de l'envoi d'étalons au Bureau International, lorsque la voie diplomatique, la plus simple, n'est pas utilisée : le Bureau doit être averti au moins 15 jours à l'avance du poids net et du poids brut des colis, des numéros des étalons, et du poste frontière d'entrée en France (gare, port, aéroport, ou poste routier).

Travaux sur les unités absolues.

Mr le PRÉSIDENT invite chacun à résumer les travaux de son laboratoire sur les unités absolues.

MM. RAYNER et HARTSHORN pour le N. P. L. et Mr THOMAS pour le N. B. S., n'ont rien à ajouter aux rapports distribués (Annexes E 3, p. E 31 et E 4, p. E 36).

Mr VOLET espère que les nouvelles mesures absolues de

l'accélération due à la pesanteur qui sont en cours au Bureau International et ailleurs auront fourni, avant 1959, les résultats qui sont indispensables à la réduction définitive des déterminations de l'ampère absolu.

Mr KALRA rappelle que Mr Romanowski, au National Research Council, pourra donner, après achèvement des comparaisons de 1957, le résultat de la mesure absolue de l'ohm (Annexe E 5, p. E 48), qui concordera semble-t-il avec les valeurs actuelles à quelques millièmes près.

Mr CHRAMKOV est prêt à fournir tout renseignement supplémentaire sur les rapports (Annexes E 6 à E 11, p. E 51) qui résument des études déjà publiées en langue russe dans les *Travaux de l'Institut de Métrologie D. I. Mendéléév*.

Mr CLOTHIER expose la méthode à l'essai au National Standards Laboratory d'Australie pour mesurer l'unité de capacité électrique en valeur absolue au moyen d'un condensateur dont la capacité est calculable d'après la mesure d'une seule longueur, de l'ordre de 125 mm, moyennant certaines conditions de symétrie; quelques résultats seront peut-être connus dans 6 à 12 mois.

Mr LINCKH, tout en notant qu'aucun rapport n'a été préparé par la Physikalisch-Technische Bundesanstalt en Allemagne, se reporte aux indications fournies par Mr Zickner au Comité Consultatif en 1952 (*Procès-Verbaux du C. I. P. M.*, 233, 1952, p. E 39), et confirme que des travaux sont en cours pour la détermination absolue de l'ohm par une bobine calculable, avec pont de Maxwell pour la mesure du rapport $\frac{L}{C}$, et pont à résonance pour le produit LC. Le noyau, en porcelaine spéciale, est déjà acquis; il ne sera pas rainuré afin que son diamètre soit mieux défini. Le fil de cuivre pur, après tréfilage au diamant, a une susceptibilité magnétique de $0,6 \cdot 10^{-6}$. La réalisation définitive de l'ohm ne sera probablement pas terminée en 1960.

Mr CHRAMKOV demande quels sont les avantages de la porcelaine sur le pyrex ou la silice.

Mr le PRÉSIDENT et Mr LINCKH déclarent que les progrès remarquables dans le domaine de la céramique ont fait préférer cette porcelaine dure spéciale, facile à travailler, malgré sa

dilatabilité plus grande que celle de la silice, mais cependant favorable.

Mr NAITO donne lecture du résumé des travaux japonais (Annexe E 12, p. E 80).

**Propositions sur la réalisation et la comparaison
des unités électriques.**

Mr CHRAMKOV présente la proposition (cf. Annexe E 6, p. E 53) invitant les Laboratoires nationaux qui ont les moyens nécessaires, à entreprendre simultanément les travaux sur la détermination absolue des valeurs des étalons des unités de résistance électrique et de force électromotrice, et à soumettre les résultats obtenus au cours de la session du Comité Consultatif en 1959.

Mr CHRAMKOV propose ensuite des comparaisons circulaires des étalons de l'ohm et du volt; ces comparaisons seraient susceptibles d'éliminer des erreurs systématiques éventuelles grâce à une connaissance plus détaillée des conditions métrologiques dans chaque pays.

Mr le PRÉSIDENT estime que, compte tenu des difficultés de transport des étalons, de telles comparaisons devraient, pour avoir des chances de succès, être très soigneusement préparées par le Bureau International, en liaison avec le laboratoire de l'U. R. S. S.

Mr VOLET rappelle que la proposition de l'U. R. S. S. prévoit aussi des comparaisons d'étalons de capacité; le Bureau International ne serait pas équipé pour y participer. Après consultation des Membres, Mr le PRÉSIDENT constate que la plupart des Laboratoires nationaux sont favorables à des comparaisons d'étalons de capacité.

Mr CHRAMKOV précise que ces étalons seraient isolés au mica; leur capacité, environ $0,1 \mu\text{F}$, serait mesurée en utilisant une fréquence de $1\ 000 \text{ Hz}$. Ces mesures auraient certainement une utilité pratique.

Mr HARTSHORN confirme l'utilité d'être renseigné sur l'exactitude des mesures, ou la stabilité des étalons de ce genre; il possède aussi des étalons portatifs de $0,1 \mu\text{F}$.

Mr le PRÉSIDENT constate que le Comité Consultatif approuve unanimement le projet de comparaisons internationales d'étalons de capacité et prie le Bureau International d'organiser ces comparaisons avec Mr CHRAMKOV et ses collègues de l'U.R.S.S.

**Matériaux pour les étalons de résistance.
Résistances étalons en métaux purs,
compensées pour la température
ou définies à la température d'un point fixe.**

Mr NAITO donne lecture du résumé des travaux japonais sur les propriétés des alliages analogues à la manganine (Annexe E 15, p. E 94). Il présente au Comité deux échantillons de fil d'un alliage cuivreux contenant 12 % Mn, 2 % Ni, 0,25 % Fe et 0,1 % Si, différant par le recuit et le traitement mécanique.

Mr HARTSHORN constate que la manganine qui lui a donné des résultats très satisfaisants se place précisément, par sa composition, dans le domaine trouvé le plus favorable par les Japonais.

Mr THOMAS signale des expériences de la Société « Leeds et Northrup » montrant que la manganine peut être améliorée, soit par l'addition d'une quantité de fer inférieure à 0,25 %, soit par l'addition de germanium ou de titane qui diminue la variation thermique de la résistance sans altérer la stabilité.

Au sujet des essais sur l'alliage or-chrome, Mr THOMAS n'a pas de résultat nouveau; de son côté, le Deutsches Amt für Mass und Gewicht n'a pas terminé ses expériences.

Mr CHRAMKOV, tout en constatant comme Mr HARTSHORN l'excellente stabilité des bobines de manganine fabriquées avec les précautions nécessaires, reconnaît l'utilité de l'étude de nouveaux alliages et des essais avec des métaux purs.

Mr VOLET explique pourquoi, malgré les difficultés rencontrées ailleurs, au National Physical Laboratory par exemple, le Bureau International tente de réaliser des résistances étalons en métaux purs; c'est que la stabilité de la manganine n'a été contrôlée que par comparaison à la manganine elle-même.

Mr LECLERC donne quelques indications sur les tentatives en cours ou en projet au Bureau International, pour constituer

des résistances en platine, en nickel, ou en or d'abord, puis à mercure (Annexe E 16, p. E 95); pour assurer la stabilité, l'uniformité et la reproductibilité de la température de définition de l'étalon, on prévoit de l'enfermer dans une cellule à point triple de l'eau.

Mr le PRÉSIDENT attire l'attention sur la difficulté de purifier les métaux nobles, et sur l'efficacité du contrôle de pureté par comparaison des paliers de fusion et de solidification; c'est ainsi que Mr Moser, à la P. T. B., complète les méthodes d'analyse chimique et spectroscopique pour l'obtention d'or pur.

Mr CHRAMKOV ajoute que la réalisation d'étalons stables de résistance, ainsi que de thermomètres à résistance, intéresse à la fois la chimie, la physique et la thermodynamique.

MM. VOLET et LECLERC précisent que les travaux poursuivis au Bureau International ont seulement pour but de mettre en évidence les variations éventuelles de la manganine en se référant à un métal pur, dont l'évolution physico-chimique est probablement moindre que celle d'un alliage.

Mr LINCK expose alors sa proposition d'étalon de résistance sous forme de quadripôle thermiquement compensé (Annexe E 17, p. E 97). Un modèle d'essai a été réalisé avec les métaux Cu et Ni. En combinant Pt et Ni, les bobines composantes devront avoir une résistance de l'ordre de 5Ω . On s'attend à une précision d'environ 10^{-6} lorsque la mesure de la résistance est faite à une intensité de courant définie.

Mr le PRÉSIDENT et Mr CHRAMKOV considèrent que ces tentatives, qui sortent des voies traditionnelles, constituent une marche vers le progrès.

Installations du Bureau International.

Mr le PRÉSIDENT, en appelant ce point de l'Ordre du Jour, y retrouve un des soucis permanents et fondamentaux du Comité International.

Mr VOLET retrace brièvement l'historique des installations électriques du Bureau International, qui furent réalisées il y a 25 ans tout d'abord par Mr Romanowski, aidé de Mr Leclerc. Grâce aux études de Mr Romanowski, puis de Mr Gautier,

et avec l'appui des Laboratoires nationaux, ces installations ont été constamment améliorées et semblent donner entière satisfaction. On peut compter sur Mr Leclerc pour l'avenir.

Mr VOLET tient en outre à remercier le National Standards Laboratory, qui a offert au Bureau International un instrument électrique récemment conçu et réalisé dans ce laboratoire australien. Mr LECLERC indique que cet instrument, destiné au passage de 1 à 100 Ω , comporte 10 éléments de 10 Ω chacun pouvant être connectés en série ou en parallèle par des contacts à mercure. Le rapport 100 est réalisé avec précision sans qu'il soit nécessaire de connaître la valeur exacte des résistances partielles de 10 Ω . On n'a pas encore eu le temps de comparer cette méthode nouvelle à la méthode anciennement utilisée qui est beaucoup plus longue.

Mr le PRÉSIDENT et Mr BOURDOUN, en tant que Membres du Comité International, qui se préoccupent constamment de la modernisation du Bureau International et du maintien de son niveau scientifique à la hauteur qu'exigent les développements des Laboratoires nationaux, se réjouissent de cette contribution à l'amélioration de son matériel.

Aucune autre question n'étant soulevée, Mr le PRÉSIDENT remplit un devoir agréable en remerciant sincèrement le Comité Consultatif de l'esprit de cordiale coopération qui a permis, sans scrutin, de régler des questions délicates, à la satisfaction de tous, espère-t-il.

Mr LOMBARDI transmet les salutations cordiales et nostalgiques de son père, qui a participé à plusieurs sessions de ce Comité Consultatif. Il se fait l'interprète de ses Collègues pour remercier Mr le PRÉSIDENT de l'art parfait avec lequel il a dirigé les travaux.

Mr le PRÉSIDENT charge Mr LOMBARDI de transmettre à son père les vœux du Comité Consultatif et, après ses salutations d'adieu, lève la séance à 17^h45^m.

HUITIÈME RAPPORT
DU
COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ
AU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Par P. DE LA GORCE, Rapporteur.

Le Comité Consultatif d'Électricité s'est réuni le jeudi 6 juin 1957 au Pavillon de Breteuil, à Sèvres.

Étaient présents : Mr VIEWEG, Président; MM. BLECHSCHMIDT, CHRAMKOV, DE LA GORCE, HARTSHORN, HÉROU, KALRA, KÖNIG, LINCKH, LOMBARDI, NAITO, RAYNER, THOMAS, VOLET, Membres du Comité Consultatif; Mr BOURDOUN, Membre du Comité International; MM. CLOTHIER et TERRIEN, invités.

MM. BUDEANU et YOVANOVITCH s'étaient excusés.

Mr TERRIEN fut nommé Secrétaire et Mr DE LA GORCE Rapporteur.

COMPARAISONS INTERNATIONALES DE 1953 ET DE 1955.
UNIFICATION DES UNITÉS ÉLECTRIQUES.

Les résultats des comparaisons internationales publiés aux *Procès-Verbaux du C. I. P. M.*, 24, 1954, p. 138 et 147; 25, 1956, p. 120 et 129, montrent en général une très bonne identité des unités conservées dans les divers pays, à l'exception de l'unité de résistance du Deutsches Amt für Mass und Gewicht et de l'unité de force électromotrice de l'U. R. S. S.

Les étalons du D. A. M. G. étant stabilisés depuis 1950, une nouvelle valeur leur sera désormais attribuée afin qu'ils soient en accord avec l'ohm du Bureau International.

La discussion sur la question de l'unification des unités élec-

triques a montré le désir unanime du Comité Consultatif de ne pas modifier les valeurs actuelles des unités avant l'examen des résultats des nouvelles mesures absolues en cours, et de reporter l'unification des unités électriques en 1959, avant la Conférence Générale de 1960.

COMPARAISONS FUTURES.

La périodicité des comparaisons électriques internationales, actuellement de deux ans, pourrait être plus étendue en raison de la bonne stabilité des étalons électriques actuels.

Après un échange de vues sur cette question, l'espacement des comparaisons internationales complètes est envisagé, la fréquence de comparaison des étalons du Bureau International devant rester inchangée. On confirme la faculté laissée à chaque Laboratoire national de faire procéder au Bureau International à des mesures supplémentaires en dehors des comparaisons internationales complètes.

La prochaine comparaison pourrait être effectuée, sans trop de hâte, avant la réunion du Comité Consultatif en fin 1959 ou au début de 1960.

TRAVAUX SUR LES UNITÉS ABSOLUES.

De nombreux travaux récents sur les unités absolues ont été effectués. Ces travaux concernent :

A l'Institut de Métrologie D. I. Mendéléev (U. R. S. S.) : la réalisation de l'ohm par des étalons d'inductance et de fréquence; la détermination de l'ampère à la balance de courant et l'établissement de la valeur de l'étalon du volt; l'établissement de l'étalon primaire de capacité.

Au National Physical Laboratory (Royaume-Uni) : la construction d'un nouvel étalon primaire d'inductance mutuelle du type Campbell; la reconstruction du pont de Campbell utilisé conjointement avec l'étalon primaire pour la détermination absolue de l'ohm, et une redétermination de l'ampère avec la balance de courant.

Au National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique) : de nouvelles mesures à l'électrodynamomètre de Pellat et à la balance de courant, et l'étude d'un procédé de contrôle de la conservation de l'ampère par le réglage, dans des solénoïdes de grande longueur, de l'intensité du champ magnétique qui provoque une fréquence déterminée de la résonance protonique.

A l'Electrotechnical Laboratory (Japon) : la détermination de l'ohm au moyen de bobines d'inductance et le calcul des corrections à apporter à celles-ci.

A côté de ces travaux, dont les résultats ont été communiqués au Comité Consultatif, des déterminations sont également en cours au National Research Council (Canada), au National Standards Laboratory (Australie) à l'aide d'un condensateur calculable, et à la Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Allemagne).

Une Note du D. A. M. G. a rendu compte par ailleurs de travaux préliminaires pour la détermination absolue de l'ampère par une méthode de calorimétrie différentielle.

PROPOSITIONS POUR LA COMPARAISON DES UNITÉS ÉLECTRIQUES.

L'Institut de Métrologie de l'U. R. S. S. a présenté deux propositions :

a. La première proposition concerne la détermination simultanée, par les Laboratoires nationaux, de la valeur absolue de leurs étalons (résistance électrique et force électromotrice). Les résultats en seraient soumis à la session du Comité Consultatif en 1959; des comparaisons circulaires de ces étalons renseigneraient sur les erreurs systématiques éventuelles des méthodes employées par chaque Laboratoire.

Le Comité Consultatif a estimé que ces travaux, pour être menés avec succès, devraient être préparés très soigneusement par le Bureau International.

b. La seconde proposition envisage une comparaison internationale d'étalons de capacité. Cette proposition ayant été unanimement approuvée par le Comité Consultatif, le Bureau International a été chargé d'organiser cette comparaison en liaison avec l'Institut de Métrologie.

Les étalons pour cette comparaison seraient isolés au mica; leur capacité, de 0,1 μ F, serait mesurée à 1 000 Hz.

ÉTALONS DE RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE.

Des recherches ont été effectuées dans différents pays pour améliorer les étalons de résistance en diminuant leur coefficient thermique et en augmentant leur stabilité.

Les Laboratoires du Royaume-Uni, des États-Unis et surtout du Japon, ont mis au point des alliages analogues à la manganine, mais présentant de plus faibles coefficients de température (α de l'ordre de quelques 10^{-6} , β inférieur à 10^{-6}). Deux alliages Cu-Mn, contenant de faibles quantités de Ni, Fe, Si pour l'un et de Si, Sn et Ge pour l'autre, ont été plus spécialement étudiés à l'Electro-technical Laboratory.

Un quadripôle composé de deux circuits dans lesquels deux résistances de métaux purs différents (Pt et Ni, ou dans un modèle d'essai Cu et Ni) sont connectées en série, a été étudié à la P. T. B. en vue de réaliser un étalon de résistance thermiquement compensé.

Le Bureau International poursuit l'étude d'étalons de référence en métaux purs (platine, nickel, or, mercure). Quelques détails ont été donnés sur les expériences en cours et sur les difficultés rencontrées pour la réalisation d'enceintes assurant la stabilité, l'uniformité et la reproductibilité de la température de définition de l'étalon.

INSTALLATIONS DU BUREAU INTERNATIONAL.

L'amélioration constante des installations du Bureau International est le souci permanent et fondamental du Comité International.

Réalisées il y a 25 ans, les installations du Bureau International se sont développées grâce aux travaux des physiciens du Bureau et à l'appui reçu des Laboratoires nationaux. Récemment, le National Standards Laboratory d'Australie a offert au Bureau International un instrument électrique destiné au passage de 1 à 100 Ω ; cet instrument comprend 10 éléments de 10 Ω chacun pouvant être connectés en série ou en parallèle par des contacts à mercure. Grâce à cet étalon, qui réalise le rapport 100 avec un haut degré de précision, de nouvelles méthodes de mesure plus rapides pourront être vraisemblablement utilisées.

Le Président du Comité Consultatif d'Électricité et Mr BOURDOUN, en tant que Membres du Comité International, ont exprimé leurs remerciements au N. S. L. pour cette précieuse contribution au maintien du niveau scientifique du Bureau International.

(Fontenay-aux-Roses, Novembre 1957.)

ANNEXE E 1.

National Physical Laboratory (Royaume-Uni).

OBSERVATIONS SUR LE GROUPE DE RÉFÉRENCE
DE PILES ÉTALONS UTILISÉES
AU NATIONAL PHYSICAL LABORATORY
POUR LA CONSERVATION DU VOLT

Par L. HARTSHORN et J. J. DENTON.

(Traduction.)

Le volt, dont la dernière détermination au National Physical Laboratory résulte des mesures absolues achevées en 1936, a été conservé depuis au moyen d'un groupe de 30 piles étalons sélectionnées, dont on a supposé constante la valeur moyenne. Les piles ont été sélectionnées pour leur constance les unes par rapport aux autres à partir de lots construits à différentes époques, un sous-groupe étant choisi dans chaque lot après un délai suffisant pour que la stabilité maximum ait été atteinte; chaque fois qu'un sous-groupe montrait une dérive significative par rapport à la valeur moyenne du groupe complet, il était rejeté.

Pendant les vingt dernières années, l'unité a été conservée principalement au moyen de cinq sous-groupes construits entre 1928 et 1937. Les piles construites entre 1945 et 1951 n'ont pas montré une stabilité tout à fait aussi bonne, et bien que le sous-groupe le plus récent paraisse satisfaisant, il n'a pas encore fourni des résultats en nombre suffisant pour influencer l'unité réalisée par le groupe complet.

Un examen des valeurs obtenues dans ces vingt dernières années ne montre aucun signe de dérive générale parmi les sous-groupes. Les valeurs moyennes pour chacun des cinq sous-groupes mentionnés présentent des variations sans régularité apparente d'environ $\pm 1 \mu\text{V}$, le changement relatif le plus grand entre deux valeurs quelconques n'ayant jamais dépassé $4 \mu\text{V}$ pendant toute cette période.

Les résultats des comparaisons internationales effectuées à Sèvres entre 1939 et 1955 indiquent une diminution de $2 \mu\text{V}$ de l'unité du N. P. L. par rapport à celle qui est conservée par le groupe du Bureau International des Poids et Mesures, et cependant l'unité N. P. L. reste plus grande de $4 \mu\text{V}$ que celle du Bureau International. Étant donné les incertitudes des déterminations absolues et des comparaisons internationales, qui impliquent des erreurs dues au transport des étalons, il n'a pas paru opportun d'ajuster l'unité du N. P. L. de façon à éliminer cette différence, qui est sans importance dans l'utilisation pratique des étalons; il a semblé préférable de maintenir la continuité dans les observations du N. P. L., car elle révélerait plus nettement toute dérive qui pourrait se produire.

Les variations de l'unité N. P. L. par rapport aux unités des autres Laboratoires nationaux, telles qu'elles résultent des comparaisons du Bureau International, sont à peu près du même ordre de grandeur que les variations mentionnées ci-dessus et confirment la conclusion générale qu'il n'existe pas de signe d'une dérive appréciable des étalons de force électromotrice. Il est très satisfaisant de noter que les piles étalons à électrolyte acide peuvent rendre d'excellents services pendant une durée d'une trentaine d'années.

(29 avril 1957.)

ANNEXE E 2.

National Physical Laboratory (Royaume-Uni).

COMPORTEMENT DES RÉSISTANCES ÉTALONS EN MANGANINE UTILISÉES POUR LA CONSERVATION DE L'OHM

Par L. HARTSHORN et J. J. DENTON.

(Traduction.)

INTRODUCTION. — En application des accords internationaux existants, spécifiant qu'à partir du 1^{er} janvier 1948 toutes les mesures de résistance électrique doivent être exprimées en fonction de l'ohm (cette unité étant définie d'une façon absolue, c'est-à-dire sans aucune référence à des étalons matériels de résistance, mais uniquement en fonction des unités de base de longueur, de masse et de temps, et d'après les lois généralement admises de l'électromagnétisme), deux séries de mesures doivent être faites dans les laboratoires d'étalonnage.

Premièrement, il faut que certains étalons de résistance, utilisables dans les mesures comparatives habituelles de haute précision, aient leurs valeurs mesurées en ohms par la série complexe des opérations qui constituent une mesure absolue, opérations souvent désignées sous le nom de détermination absolue de l'ohm ou, plus proprement peut-être, de réalisation de l'ohm.

Deuxièmement, il est nécessaire que les étalons utilisés pour la réalisation de l'ohm soient gardés en observation afin que tout changement de la résistance d'un étalon soit décelé et qu'un changement correspondant soit apporté à la valeur qu'on lui attribue, conformément au principe que l'ohm lui-même, comme les unités de base impliquées dans sa définition, est constant par définition. Cette opération, qui consiste à observer les variations des étalons utilisés pour la réalisation de l'ohm et à faire les corrections appropriées à leurs valeurs, peut être appelée conservation de l'ohm, et elle doit être faite pendant toute la durée

qui sépare deux déterminations absolues successives afin que toutes les mesures soient exprimées correctement en ohms à tout moment.

Pour économiser le travail scientifique, il est probable que l'intervalle entre les déterminations absolues sera d'environ 10 à 20 ans; il est donc important de considérer les incertitudes qu'entraîne la conservation de l'ohm pendant de telles durées. La présente Note décrit les travaux faits dans ce sens au National Physical Laboratory dans les vingt dernières années et montre en particulier l'ordre de grandeur de l'incertitude à craindre avec les résistances étalons modernes en fil de manganine recuit.

LES GROUPES DE RÉFÉRENCE. — Il faut noter que l'incertitude d'une détermination absolue est évaluée à présent à environ 10.10^{-6} , mais que les mesures comparatives peuvent être effectuées sans difficulté exagérée à 1.10^{-6} et qu'elles sont significatives avec une précision quelque peu meilleure. Ainsi, les mesures comparatives fournissent le meilleur moyen d'observer les variations qui se produisent dans les résistances étalons de mois en mois ou d'année en année, mais les changements observés ne sont nécessairement que des changements relatifs. Pour un groupe donné d'étalons de résistance de même valeur nominale, on peut facilement, grâce à une série de mesures par substitution, déterminer les variations de chaque résistance par rapport à la valeur moyenne de l'ensemble du groupe, mais ces mesures ne garantissent aucunement que la valeur moyenne de l'ensemble du groupe ne dérive pas par rapport à l'unité absolue, l'ohm. Seules des mesures absolues peuvent mettre en évidence une telle dérive; mais si l'on compare à différentes époques les éléments de deux groupes de résistances différant par leur âge et leur construction, il n'est pas déraisonnable de supposer, en l'absence d'autres informations, que la dérive probable de la valeur moyenne de chacun est du même ordre de grandeur que la dérive des valeurs moyennes l'une par rapport à l'autre.

Le groupe de référence d'étalons de 1Ω du National Physical Laboratory est étudié comme nous venons de l'indiquer. Il a servi à la conservation de l'ohm depuis les mesures absolues de 1936. Les écarts relatifs entre les valeurs individuelles et la valeur moyenne ont été observés d'une façon détaillée; d'après les résultats des mesures comparatives faites au Bureau International des Poids et Mesures et d'après des comparaisons occasionnelles faites directement avec des étalons du National Bureau of Standards, Washington, on a évalué la dérive entre la moyenne du groupe de référence du N. P. L. et les groupes correspondants du N. B. S. et du B. I. P. M. Ces dérives fournissent quelque indication sur l'erreur qui risque de se produire au cours du temps

dans la valeur de l'ohm tel qu'il est matérialisé par les groupes de référence, Ω_{BIPM} , Ω_{NBS} , Ω_{NPL} , etc., par rapport à l'ohm conforme à la définition internationale. Cette Note a pour but d'exposer les résultats obtenus jusqu'ici.

Les résistances du groupe de référence actuel du National Physical Laboratory [1] ont été construites en 1934. Elles comportaient un enroulement de fil de manganine, qui était recuit à 550° C après le bobinage, la couche superficielle du fil, dont la composition est modifiée par le chauffage, étant alors éliminée chimiquement; les bobines ainsi traitées étaient introduites sur des supports isolants agencés de façon à éviter toute contrainte mécanique, et montées dans des boîtiers hermétiques contenant du pétrole.

Les résistances du groupe du N. B. S. [2] sont construites d'une façon assez semblable, mais les bobines sont dans l'air et non dans le pétrole.

Le groupe du B. I. P. M. [3] comprend des résistances du N. P. L. et du N. B. S., ainsi que des résistances d'origines différentes. Si les écarts par rapport à la moyenne étaient dans ce groupe aussi faibles, ce serait une preuve encore meilleure de la constance de l'ohm moyen Ω_{BIPM} . En d'autres termes, on devrait s'attendre à trouver pour ce groupe du B. I. P. M. de plus grands écarts par rapport à la moyenne, à cause des différences dans l'âge et le mode de construction de chaque résistance.

On peut noter au passage que le groupe de référence actuel du N. P. L., bien qu'il ait été construit en 1934, n'a pas en fait été utilisé comme groupe fondamental pour la conservation de l'ohm avant 1947, date à laquelle il était devenu certain que la constance relative présentée par ce groupe de bobines était bien supérieure à celle des autres groupes employés précédemment. Le N. P. L. a utilisé au cours de son histoire quatre groupes d'étalons. Le premier groupe était la série primitive de bobines de la British Association, en platine-argent et en autres métaux; leur comportement a déjà été décrit assez complètement [4] et il n'est pas nécessaire d'y revenir. Ce groupe a été remplacé en 1910 par un petit groupe de bobines de manganine (N° 1), qui a montré une constance relative bien meilleure. Vers 1930, on a remarqué que les bobines de manganine recuites après bobinage présentaient une constance relative encore meilleure que le groupe de référence N° 1; un groupe de nouvelles bobines (N° 2) a donc été adopté comme étalon et est resté en usage pendant toute la durée de la guerre, alors que relativement peu de travail pouvait être consacré aux étalons. Lorsque cette question a été reprise après la guerre, on a observé que le groupe de construction la plus récente (N° 3), qui différait des groupes antérieurs par un recuit plus complet et un montage évitant toute contrainte mécanique,

présentait une constance relative meilleure que tout autre groupe. Sa valeur moyenne était en accord avec celle de l'ancien groupe N° 1 dans la limite des erreurs de ce groupe N° 1, mais la valeur moyenne du groupe N° 2 montrait une dérive sensible par rapport au N° 1 et au N° 3. Le groupe N° 2 fut écarté en tant qu'étalon et toutes les valeurs fondées sur l'hypothèse de la constance de sa valeur moyenne furent corrigées en admettant que la valeur moyenne du groupe N° 3 était bien restée constante; cette conclusion, confirmée par les valeurs du groupe bien vieilli N° 1, laisse penser que les bobines du groupe N° 2 subissaient une dérive en relation avec un recuit incomplet.

Ce « sauvetage » de l'ohm en 1947 fournit un bon exemple de la valeur et des limitations des mesures comparatives pour la conservation de l'unité. Une répétition [5] de la détermination absolue a aussi été faite et, dans les limites de l'incertitude estimée de cette détermination, elle confirme les valeurs conservées comme nous l'avons fait. La reproductibilité d'une détermination absolue n'a cependant pas encore atteint celle des mesures comparatives, bien que la reproductibilité d'une mesure absolue par une même méthode soit bien meilleure que l'incertitude globale de la valeur absolue.

VALEURS RELATIVES POUR LE GROUPE DE RÉFÉRENCE DU N.P.L.

— Le groupe de référence actuel (N° 3) comprend cinq bobines sélectionnées parmi un lot de dix de construction identique fabriquées en 1934. Dans l'hypothèse que la valeur moyenne de ces cinq bobines reste constante, des valeurs sont attribuées à chacune de ces cinq bobines et à toute autre bobine par des mesures purement comparatives qui, à l'époque actuelle, sont reproductibles à $1 \cdot 10^{-7}$, c'est-à-dire à $0,1 \mu\Omega$ pour des bobines de 1Ω . Les valeurs obtenues de cette façon pour tous les étalons actuels et anciens ont été notées d'une façon détaillée depuis 1936, date des mesures absolues les plus complètes. L'essentiel des résultats est le suivant :

a. Pour chacune des bobines du groupe de référence et depuis 1934, année de leur construction, les valeurs moyennes pour chaque année sont représentées en fonction du temps sur la figure 1; elles se placent très près de lignes droites; sauf pendant les années 1939 à 1943, où une seule série d'observations a été faite, trois points seulement s'écartent des droites d'une quantité supérieure à $0,2 \mu\Omega$; les pentes pour les cinq bobines sont $+ 0,05$, $+ 0,01$, $0,00$, $- 0,03$ et $- 0,03 \mu\Omega$ par année. En d'autres termes, aucune bobine de ce groupe n'a présenté par rapport à une autre une variation relative supérieure à $1,6 \cdot 10^{-6}$ en 20 ans.

b. Parmi les cinq autres résistances du même lot de dix, trois

sont maintenant au National Standards Laboratory, Australie, depuis 1940, et n'ont donc pas été suivies aussi attentivement. Cependant, une comparaison récente d'étalons a montré que la dérive totale de ces trois bobines par rapport au groupe du N. P. L. s'élève à $+ 0,02, 0,00$ et $- 0,04 \mu\Omega$ par année. Il est par conséquent probable que la constance de ces bobines est à peu près la même que dans le cas du groupe du N. P. L.

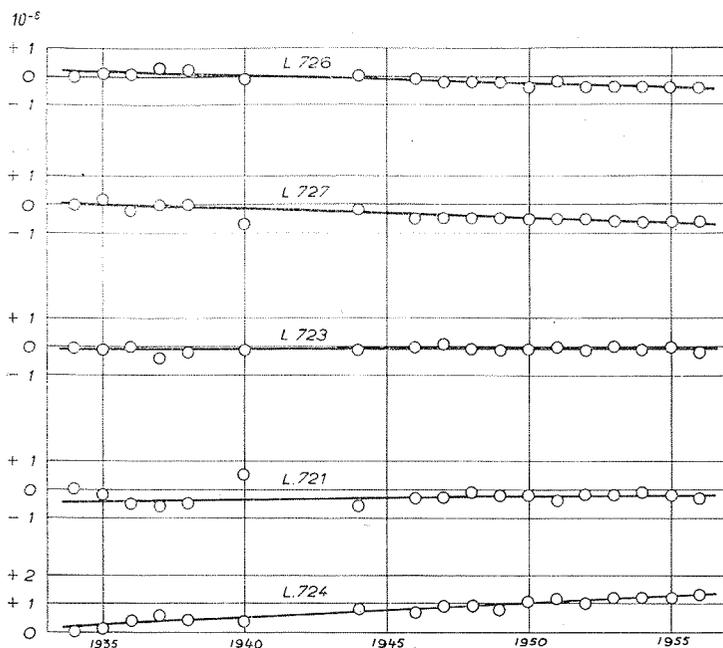


Fig. 1. — Variations en fonction du temps de la résistance des bobines de 1Ω du N. P. L. (groupe N° 3).
Le rayon des cercles équivaut à $2 \cdot 10^{-7} \Omega$.

[Les deux dernières résistances du lot ont été remises au Bureau International en 1946; leur dérive par rapport au groupe du N.P.L. n'a donc pas été mesurée directement. Cependant, on peut noter que l'une de ces résistances (N 722) est maintenant comprise dans le groupe GO 4 du B. I. P. M., tandis que l'autre (N 725) semble être considérée comme un peu moins stable.]

COMPARAISONS AVEC LES GROUPES DU B. I. P. M. ET DU N. B. S.
— D'après les résultats des comparaisons internationales publiés par le B. I. P. M., il est possible d'évaluer la dérive relative du groupe N. P. L. et du groupe GO' 3 (ou GO 4, à partir de 1954)

du B. I. P. M.; de même, les résultats donnés pour les bobines du N. B. S. rendent possible l'évaluation de la dérive relative du groupe du N. B. S. qui, comme le groupe du N. P. L., paraît être constitué de résistances toutes d'un même type, tandis que le groupe du B. I. P. M. comprend plusieurs types, parmi lesquels des bobines du N. P. L. et du N. B. S. Il est certain que ces comparaisons sont fondées sur des observations assez peu nombreuses, et l'on ne peut pas savoir avec la même certitude si elles sont dans tous les cas représentatives du groupe en question; mais comme ces comparaisons sont les seules à fournir des renseignements sur un sujet de grande importance pour tous ceux qui sont chargés de la conservation des étalons électriques, nous donnons ici les valeurs que nous avons pu déduire de notre documentation.

Considérons d'abord le groupe du N. B. S., qui ressemble le plus au groupe du N. P. L. Les publications du N. B. S. [2], [6] rapportent qu'il comprend dix bobines semblables de 1Ω adoptées comme étalons en 1939. Les résultats des mesures comparatives publiés en 1946 montrent que leur constance relative est excellente, probablement analogue à celle qui est donnée ci-dessus pour les bobines du N. P. L. Ainsi les mesures faites à Sèvres à différentes époques, sur des bobines étalonnées par comparaison à ces groupes, devraient indiquer la dérive relative des deux groupes. La déduction n'est pas aussi simple qu'elle le paraît à première vue, car dans les premières années les valeurs étaient toutes exprimées en ohm international et dans les années suivantes en ohm (absolu), et bien que le facteur de conversion adopté internationalement soit connu (à $10 \cdot 10^{-6}$ près), le facteur de conversion réel qui représente la relation entre l'ohm international tel qu'il a été réalisé dans un laboratoire et l'ohm absolu tel qu'il est réalisé dans ce même laboratoire n'est pas nécessairement égal au facteur de conversion nominal à $1 \cdot 10^{-6}$. Pour le but particulier de cette comparaison on a supposé que le facteur de conversion du N. B. S. s'exprime par

1 unité Washington (N. B. S.) = 1,000 488 ohm (absolu),
relation en accord avec le facteur employé au B. I. P. M. et au N. P. L., à savoir

$$1 \text{ ohm international} = 1,000 490 \text{ ohm (absolu).}$$

Il a fallu aussi corriger la valeur de l'unité N. P. L. obtenue en 1939 au B. I. P. M., puisque ces valeurs de 1939 étaient fondées sur le groupe de référence N° 2, qui a été remplacé ultérieurement par le groupe actuel N° 3.

Lorsque les corrections ci-dessus sont faites, les observations couvrant les années 1939 à 1955 ne montrent aucune discontinuité importante. Elles indiquent bien cependant une dérive

du groupe N. P. L. de $0,13 \cdot 10^{-6}$ par année, par rapport au groupe GO'3 du B. I. P. M. et de $0,2 \cdot 10^{-6}$ par année, par rapport au groupe du N. B. S. Il faut noter que cette dérive est environ deux fois et demie l'écart maximum observé sur les bobines à l'intérieur du groupe du N. P. L., mais une telle dérive ne serait sans doute pas mise en évidence par des mesures absolues sur un intervalle de temps inférieur à 20 années.

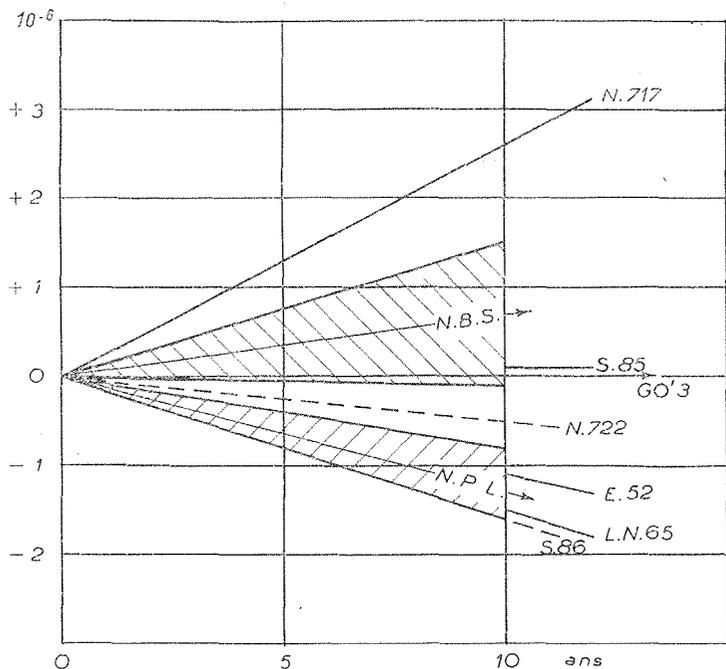


Fig. 2. — Écarts relatifs moyens des résistances de 1Ω du B. I. P. M., du N. B. S. et du N. P. L. pour une période de 10 ans, d'après les observations faites entre 1939 et 1955.

Il se pourrait que la dérive apparemment négligeable entre les groupes du B. I. P. M. et du N. B. S. soit illusoire, comme on peut le voir d'après un examen plus détaillé des résultats. La figure 2 représente graphiquement les divers écarts évalués sur un intervalle de 10 ans, le groupe GO'3 du B. I. P. M. étant pris comme référence. Les flèches montrent les dérivées moyennes qui ont été calculées d'après les résultats couvrant toute la période de 1939 à 1955. Les zones hachurées représentent les écarts à l'intérieur des groupes du N. P. L. et du N. B. S., les écarts du groupe du N. P. L. étant calculés d'après des résultats couvrant la période entière; des résultats aussi complets pour

le N. B. S. n'étaient pas à notre disposition au moment de la préparation du graphique et les valeurs inscrites sont sujettes à révision de la part du N. B. S. : elles représentent seulement une estimation fondée sur les valeurs publiées pour les années 1939 à 1945. Les écarts à l'intérieur du groupe GO' 3 ont été évalués d'après les résultats publiés par le B. I. P. M. [3] pour la période 1947 à 1954. Comme il fallait s'y attendre, la dispersion des écarts est plus grande dans ce groupe et l'on a donc figuré des droites distinctes pour chacune des bobines. Les points suivants sont à noter :

1. La dispersion des quatre bobines du groupe GO' 3 recouvre presque entièrement l'ensemble des dispersions des étalons du N. B. S. et du N. P. L.

2. Les étalons du groupe GO 4 qui ont la plus grande pente positive (N 717) et la plus grande pente négative (S 86) ont été construits respectivement au N. P. L. et au N. B. S., mais présentent des dérives dont le signe est opposé à celui des dérives des groupes de référence correspondant à ces deux laboratoires. En fait, la bobine N 717 ne provient pas du même lot que le groupe de référence N° 3 du N. P. L., mais d'un lot antérieur.

3. Les deux étalons N 722 (N. P. L.) et S 86 (N. B. S.) qui ont été ajoutés au groupe GO' 3 en 1954 pour constituer le groupe GO 4 ne se placent pas à l'intérieur du domaine de dispersion des groupes respectifs de même construction.

Il serait très intéressant d'avoir des renseignements semblables pour les étalons des autres laboratoires nationaux. Les valeurs en elles-mêmes ne sont évidemment pas d'une bien grande importance, mais le graphique montre clairement l'ordre de grandeur de l'incertitude qui se développe par l'usage des étalons de résistance de l'époque actuelle, et il indique dans quelle mesure cette incertitude dépend du comportement de chacune des bobines.

(30 avril 1957.)

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] RAYNER (E. H.), *J. Sc. Instr.*, 12, 1935, p. 294.
- [2] THOMAS (J. L.), *J. Research N. B. S.*, 36, 1946, p. 107.
- [3] *Procès-Verbaux C. I. P. M.*, 24, 1954, p. 156.
- [4] GLAZEBROOK (R. T.), HARTSHORN (L.), *Report of the British Association for the Advancement of Science*, 1932, p. 417.
- [5] RAYNER (G. H.), *Proc. Inst. Elect. Engrs.*, 101-IV, 1954, p. 251.
- [6] SILSBEE (F. B.), *N. B. S. Circular* 475, 1949.

ANNEXE E 3.

National Physical Laboratory (Royaume-Uni).

TRAVAUX RÉCENTS
SUR LES MESURES ÉLECTRIQUES ABSOLUES
AU NATIONAL PHYSICAL LABORATORY

Par G. H. RAYNER.

(Traduction.)

ÉTALON PRIMAIRE D'INDUCTANCE MUTUELLE.

L'étalon primaire en service au National Physical Laboratory est celui qui a été construit par Albert Campbell [1] en 1908 avec un enroulement secondaire [2] refait en 1936 pour remplacer l'enroulement original. Un nouvel étalon est maintenant en cours de construction; il permettra une plus grande exactitude dans les mesures et présentera une plus grande stabilité.

Le support de l'enroulement primaire du nouvel étalon est un cylindre de silice fondue de 50 cm de long, 29 cm de diamètre et d'environ 5 cm d'épaisseur de parois. L'enroulement primaire comportera deux hélices à une seule couche, de 100 spires chacune, au pas de 1 mm, séparées par une distance axiale de 20 cm. Afin de fixer exactement l'emplacement de l'enroulement primaire, une gorge de forme convenable a été taillée et soigneusement rectifiée sur le cylindre, et une technique a été mise au point afin de réaliser des rodoirs permettant d'obtenir une gorge aussi uniforme que possible. Ce travail est en cours actuellement. La technique de rodage a été essayée avec succès sur un cylindre expérimental en silice, de dimensions plus petites. Une gorge a été taillée sur ce cylindre, puis rodée; le rodage a permis de réduire la variation extrême de diamètre de 10 à 2,5 μ . Le rodage n'a pas affecté le pas et l'erreur de position axiale maximum d'une spire, par rapport au pas moyen de la bobine, est de 1 μ .

Des recherches ont été également entreprises pour la fabrication

de fil uniforme pour l'enroulement primaire. Il est grandement désirable que le fil soit initialement rectiligne et qu'il possède une section bien circulaire. On a déterminé les meilleures conditions pour le tréfilage du fil (0,6 mm de diamètre); un certain nombre de filières en diamant ont été obtenues de différentes sources et, à la suite d'essais d'étirage, on a choisi la meilleure filière. Le fil ainsi produit ne présentait que des variations de $1,2 \mu$ pour les différents diamètres d'une section quelconque. Des améliorations dans l'uniformité et la circularité ont été obtenues par redressement du fil avant le tréfilage, en appliquant une tension au fil à l'approche de la filière et par rotation de la filière pendant le tréfilage; de cette façon, les variations de diamètre du fil ont pu être rendues inférieures à $0,3 \mu$.

En plus de ce travail sur le nouvel étalon, un nouvel enroulement secondaire a été construit pour l'étalon actuel. Ce troisième enroulement secondaire a été établi en vue de diminuer l'incertitude dans la valeur de l'étalon, qui pourrait se produire par suite de la correction pour la section finie de l'enroulement secondaire; c'est la raison pour laquelle on a cherché à placer avec précision chaque spire de l'enroulement. Le support sur lequel est enroulé le secondaire est obtenu par le collage de trois anneaux en verre à vitres optiquement travaillés, suivant la méthode employée par le National Bureau of Standards [3]. L'enroulement comprend 484 spires disposées en 22 couches de 22 spires chacune; le fil, d'un diamètre de 0,46 mm, est isolé à l'émail et par un simple guipage en soie. La largeur de la gorge de la bobine était de 0,025 mm à 0,05 mm plus grande que la largeur occupée par les 22 spires étroitement jointives. Des bandes de mica de 0,05 mm d'épaisseur, placées entre les couches, procurent un support stable pour chaque couche et permettaient ainsi d'obtenir un enroulement extrêmement uniforme. Le diamètre de chaque couche était mesuré pendant le bobinage et, à l'aide de microscopes mobiles, lorsque le bobinage fut terminé. Ces deux séries de mesures ont montré que les couches internes n'avaient aucune tendance à être comprimées lors du bobinage des couches externes. Un contrôle supplémentaire des dimensions de l'enroulement a été obtenu en comparant les valeurs calculées et mesurées de la self-induction; l'accord entre ces deux valeurs étant meilleur que $1 \cdot 10^{-4}$ a été jugé satisfaisant. On a cependant noté un écart de $0,06 \mu\text{H}$, soit $6 \cdot 10^{-6}$ en valeur relative, entre la valeur de l'étalon primaire avec le nouvel enroulement secondaire et la valeur qu'il avait avec l'ancien enroulement construit en 1936; cet écart est notablement plus grand que le laissait prévoir l'incertitude sur les dimensions des enroulements. Avant de poursuivre les recherches on attend l'achèvement du nouvel étalon qui fournira un contrôle indépendant.

MESURE ABSOLUE DE RÉSISTANCE.

La détermination de l'ohm au National Physical Laboratory repose sur l'étalon d'inductance mutuelle et l'étalon de fréquence. Le circuit utilisé pour la comparaison de ces grandeurs est celui d'Albert Campbell [4].

Le pont a été construit vers 1935 et la première détermination de l'ohm a été achevée en 1936 [5]; une seconde détermination [6] a été effectuée en 1951-1952. Ces deux déterminations ont conduit au résultat suivant : 1 ohm N. P. L. = 1,000 002 ohm absolu, l'erreur maximum de la méthode étant estimée à $15 \cdot 10^{-6}$. La valeur obtenue en 1936 (1,000 501 ohm international) doit être diminuée de $490 \cdot 10^{-6}$ pour être exprimée en unités absolues, et de $9 \cdot 10^{-6}$ pour tenir compte de la valeur de l'étalon primaire qui a été révisée à la suite d'un nouveau calcul de la correction pour son enroulement secondaire. En comparant les déterminations de 1936 et de 1951, on a supposé que l'unité de résistance avait été conservée sans changement pendant cette période, par les étalons de résistance du N. P. L., en dehors du changement dû au passage aux unités absolues. Les résultats montrent du reste que l'unité est restée en fait constante à quelques millièmes. Ceci est en accord avec les valeurs données par le Bureau International des Poids et Mesures pour l'unité du N. P. L., et aussi avec les mesures du National Bureau of Standards par la méthode de Wenner [3], dont les résultats nous sont connus par les comparaisons internationales de résistances.

Une anomalie dans les mesures a été trouvée dans les deux déterminations et, malgré deux recherches indépendantes, son origine n'a pu être décelée avec certitude. Si les inductances mutuelles sont de signes opposés, leurs enroulements peuvent être connectés dans l'un ou l'autre sens et le pont peut ainsi être équilibré pour huit combinaisons différentes des connexions. La valeur de la résistance devrait être la même pour chaque combinaison, à condition que les divers petits termes correctifs aient été correctement déterminés et appliqués dans chaque cas. On a toutefois trouvé qu'il existait des différences systématiques qui dépendaient du sens dans lequel étaient connectés les divers enroulements. De par sa construction, le pont présente quelques pièces métalliques massives qui donnent un couplage appréciable en phase entre les connexions d'alimentation et de détection par suite des courants de Foucault induits dans le métal. Ce couplage était compensé par une sorte de couplage par courants de Foucault contrôlés dans un circuit fermé additionnel couplé aux liaisons d'alimentation et de détection. Un article récent de Astbury [7] montre que si ce montage ne compense pas en réalité le couplage indésirable, on peut obtenir des différences

comme celles qui ont été observées. Les observations détaillées ne donnent toutefois aucune raison de supposer que le montage n'équilibrerait pas la force électromotrice indésirable, ainsi qu'on l'avait voulu.

Le pont a été reconstruit avec beaucoup moins de métal et le couplage résiduel entre les liaisons d'alimentation et de détection a été réduit au tiers de sa valeur primitive. Le circuit a été arrangé de sorte que le couplage résiduel peut être mesuré et que l'on peut en tenir compte au lieu de le compenser. En outre, la fréquence a été changée de 100 Hz à 125 Hz pour éviter une fréquence harmonique du réseau à 50 Hz, l'interférence avec cette source étant considérablement plus grande et plus gênante que lorsque le pont a été construit la première fois. Les divers termes correctifs pour le nouveau pont ont été déterminés et l'équipement accessoire pour les circuits d'alimentation et de détection a été construit. On espère pouvoir effectuer prochainement une détermination de la résistance en fonction de l'étalon primaire d'inductance mutuelle et de la fréquence. Cette mesure ne constituera toutefois pas une nouvelle détermination de l'ohm, sauf si les dimensions de l'étalon primaire étaient remesurées. Jusqu'à présent ceci n'a pas été inclus dans le programme puisqu'un nouvel étalon est en construction.

BALANCE DE COURANT.

La balance pour la détermination de l'ampère au National Physical Laboratory a été construite et utilisée pour la première fois il y a exactement 50 ans [8]; des mesures ont été effectuées de temps en temps avec la balance dans sa forme primitive jusqu'en 1930, date à laquelle elle fut entièrement révisée et munie de nouvelles bobines [9]. Un grand nombre d'observations ont été faites entre 1930 et 1935 et les dimensions des bobines ont été mesurées trois fois en tout.

Les bobines ont été récemment remesurées pour la présente détermination; depuis 1935 elles ont toutes montré une diminution de leur diamètre moyen, d'une quantité comprise entre 10 et $27 \cdot 10^{-6}$. Les longueurs totales ont moins varié, les changements se situant entre $\pm 10 \cdot 10^{-6}$. Au cours de ces mesures on a remarqué des changements appréciables du diamètre lorsqu'on effectuait de petites rotations autour de l'axe; dans un cas, une rotation atteignant tout au plus $0^{\circ},3$ (environ $0,8$ mm à la périphérie) entraînait une variation de diamètre de 5μ . Bien que les observations soient en nombre suffisant pour que les dimensions moyennes représentent correctement les dimensions des bobines, les irrégularités du bobinage apparaissent encore excessives.

Un nouvel étalon de résistance de 1Ω , avec un coefficient

thermique inférieur à 1.10^{-6} par degré, a été construit pour être utilisé conjointement avec la balance.

A l'heure actuelle, le mécanisme de la balance est en cours de révision; après achèvement de ce travail, les mesures électriques seront commencées et l'on espère que la détermination sera terminée dans un an.

(16 avril 1957.)

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] CAMPBELL (A.), *Proc. Roy. Soc.*, A 79, 1907, p. 428.
- [2] ASTBURY (N. F.), *Phil. Mag.*, Ser. 7, 25, 1938, p. 290.
- [3] THOMAS (J. L.), PETERSON (C.), COOTER (I. L.), KOTTER (F. R.), *J. Research N. B. S.*, 43, 1949, p. 291.
- [4] CAMPBELL (A.), *Proc. Roy. Soc.*, A 107, 1925, p. 310.
- [5] HARTSHORN (L.), ASTBURY (N. F.), *Phil. Trans. Roy. Soc.*, A 236, 1937, p. 423.
- [6] RAYNER (G. H.), *Proc. Inst. Elect. Engrs.*, IV, 101, 1954, p. 251.
- [7] ASTBURY (N. F.), *Proc. Inst. Elect. Engrs.*, C 102, 1955, p. 279.
- [8] AYRTON (W. E.), MATHER (T.), SMITH (F. E.), *Phil. Trans. Roy. Soc.*, A 207, 1908, p. 463.
- [9] VIGOUREUX (P.), *N. P. L. Collected Researches*, 24, 1938, p. 173; *Phil. Trans. Roy. Soc.*, A 236, 1936, p. 133.

ANNEXE E 4.

National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique).

ÉTAT ACTUEL DES MESURES ÉLECTRIQUES ABSOLUES AU NATIONAL BUREAU OF STANDARDS

Par R. L. DRISCOLL, J. L. THOMAS et R. D. CUTKOSKY.

(Traduction.)

1. INTRODUCTION.

Bien que les « unités électriques internationales » aient été remplacées par les unités absolues le 1^{er} janvier 1948, on a continué au National Bureau of Standards le travail sur les mesures absolues. Ce travail a été orienté dans plusieurs directions, la plus importante étant la construction d'un électrodynamomètre du type Pellat [1] pour la mesure du courant électrique. Quelques travaux préliminaires avaient été faits antérieurement sur ce dynamomètre, mais depuis 1950 ce projet a été poussé activement; un article donnant les résultats est en préparation.

Pour comparer les résultats obtenus par la méthode de Pellat à ceux de 1942 [2] avec la balance de courant du N. B. S., il fallait supposer qu'il n'y avait pas eu de changement dans l'intervalle sur la valeur des unités conservées au moyen d'étalons de résistance et de force électromotrice. Pour contrôler cette hypothèse, les déterminations à la balance de courant ont été répétées aussitôt après l'achèvement des mesures à l'électrodynamomètre. Un article sur ces derniers résultats est également en préparation. Tandis que les mesures à la balance de courant avaient pour but de fournir une comparaison directe entre les deux méthodes absolues de mesure du courant électrique, leur répétition a servi à une autre fin. Elle a donné un contrôle direct concernant la conservation de l'unité de courant au moyen de piles étalons et de résistances étalons.

Pour compléter les mesures absolues, on répète en ce moment

la mesure de la résistance par la méthode de Wenner. Une série d'équilibrages électriques est achevée et une nouvelle mesure des dimensions de l'inducteur est en cours. Les résultats de ces mesures, combinés avec les résultats obtenus à la balance de courant, renseigneront sur la stabilité des unités électriques telles qu'elles sont conservées par les étalons.

En supplément de la méthode qui vient d'être décrite, un nouveau procédé est à l'essai pour le contrôle de la conservation de l'unité de courant. Il sera possible de temps à autre de reproduire exactement des champs magnétiques dans des solénoïdes de grande longueur, par exemple dans l'enroulement principal de l'électrodynamomètre de Pellat, par le réglage de l'intensité du champ qui provoque une fréquence déterminée de résonance des protons [3]. En combinant ce procédé avec une nouvelle mesure des dimensions du solénoïde et une mesure du courant par rapport aux étalons, on devrait obtenir un excellent contrôle de la conservation de l'ampère. Ce projet a été entrepris en liaison avec une redétermination du rapport gyromagnétique du proton.

2. L'ÉLECTRODYNAMOMÈTRE DE PELLAT.

L'électrodynamomètre de Pellat que nous avons utilisé comporte des enroulements en hélice à une seule couche de fil nu, dont les dimensions peuvent être contrôlées à tout moment. Pellat employait dans son instrument des enroulements à plusieurs couches. Ces enroulements produisaient un couple important avec des intensités acceptables, mais la grande incertitude sur leurs dimensions linéaires serait incompatible avec la précision requise actuellement. Une autre modification importante de notre instrument est l'utilisation d'un fléau de balance en silice fondue au lieu d'un fléau en bronze. Le solénoïde fixe de notre instrument a une longueur de 1 m et un diamètre de 28 cm; son axe est horizontal; la bobine intérieure, centrée dans le solénoïde fixe et attachée au fléau d'une balance, est un solénoïde court, de 116 mm de diamètre et 93 mm de long, dont l'axe est vertical. Le fléau de balance est muni de couteaux classiques et la bobine intérieure oscille autour du couteau central.

Lorsqu'un courant constant parcourt les deux bobines en série, la balance est équilibrée par un contre-poids convenable; après inversion du courant dans la bobine fixe, l'équilibre de la balance est rétabli par un poids placé sur le plateau. D'après la valeur connue de ce poids, la longueur du fléau de la balance, et la géométrie des enroulements, on peut calculer la valeur du courant.

Une vue d'ensemble de l'électrodynamomètre avec la bobine fixe en place est montrée par la figure 1; dans la figure 2, la bobine

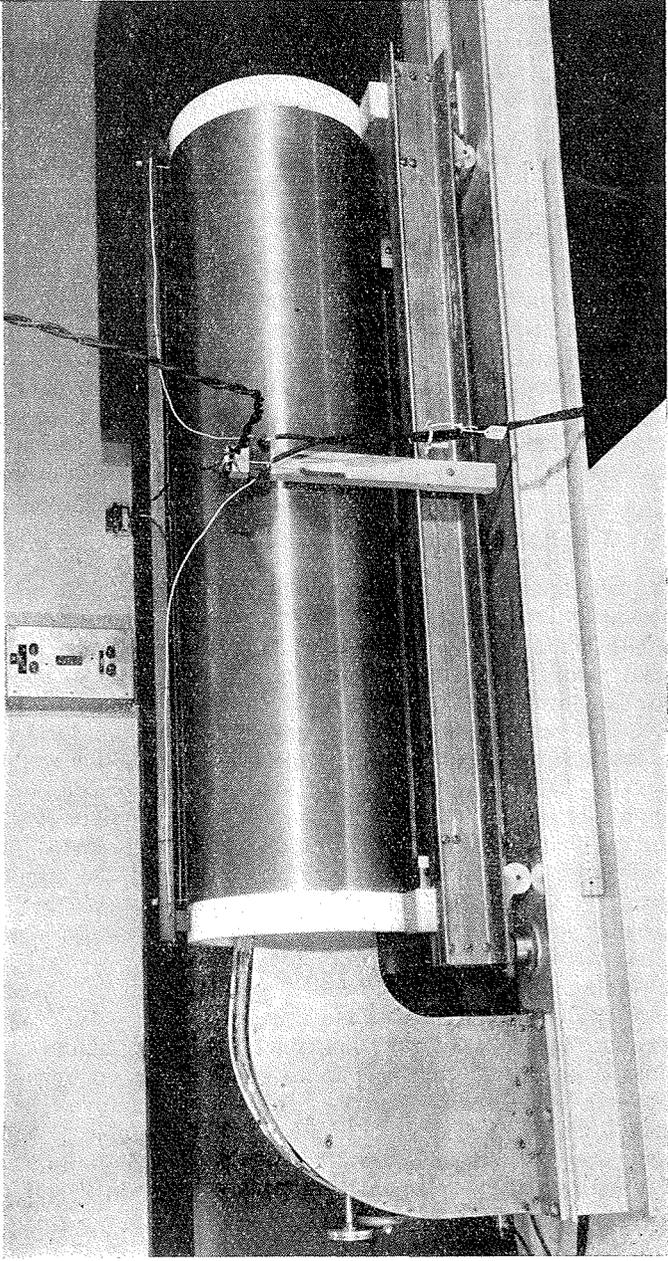


Fig. 1. — Electro-dynamomètre de Pellat.

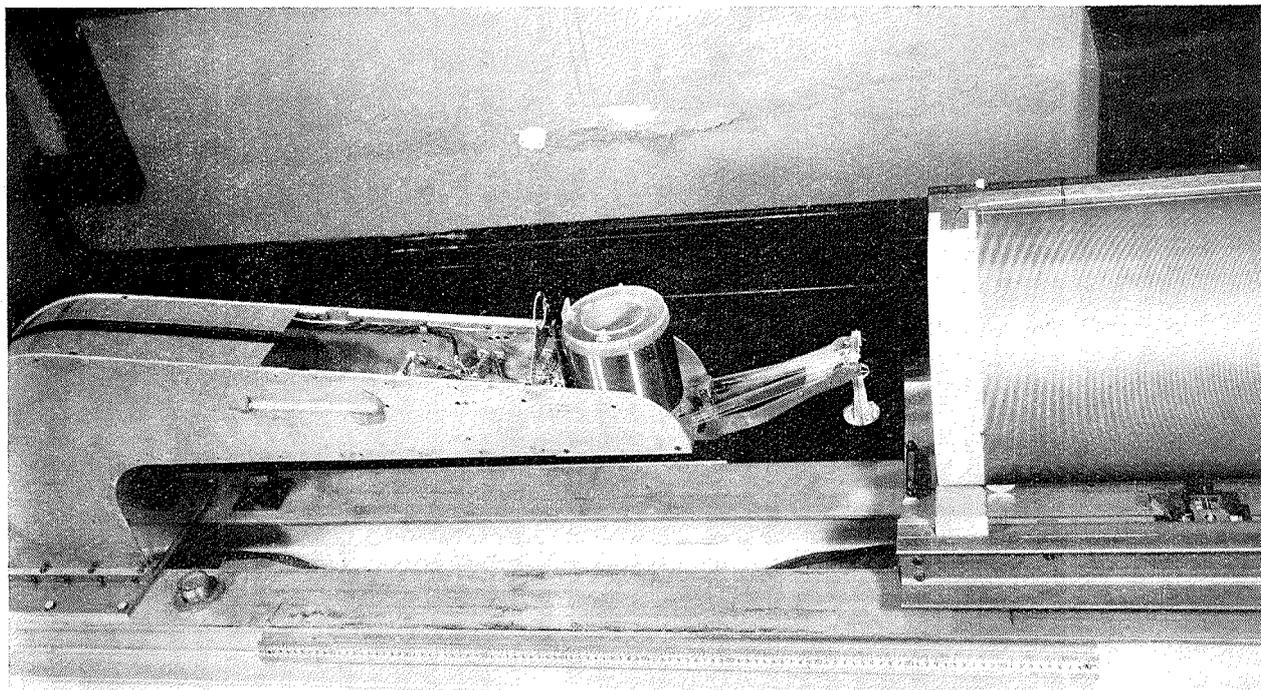


Fig. 2. — L'électrodynamomètre de Pellat avec la bobine fixe déplacée.

fixe a été déplacée de côté pour laisser voir l'intérieur de l'instrument. Les supports de la balance sont surtout en alliage d'aluminium. Une petite quantité de laiton et de bronze phosphoreux a été utilisée pour le mécanisme d'arrêt. Chaque pièce, avant d'être terminée, a été contrôlée en vue de s'assurer qu'elle avait une faible susceptibilité magnétique. Les plans et les couteaux en agate de la balance ont été rectifiés par l'atelier d'optique du National Bureau of Standards. Les connexions électriques vers la bobine mobile sont effectuées au moyen de deux séries de fils flexibles. Chaque série comprend 10 fils de cuivre nu de 25μ en parallèle, d'une longueur d'environ 75 mm. Ces fils ont été disposés géométriquement de façon à rendre tolérable l'effort qu'ils exercent sur la balance.

La bobine fixe et la bobine mobile ont été construites selon la méthode de Moon qui est décrite en détail par Curtis, Moon et Sparks [4]. Selon la méthode de Moon, le fil a été enroulé sur une rainure hélicoïdale obtenue par un rodage sur le noyau. Le noyau de la bobine fixe est en silice fondue et celui de la bobine mobile en verre pyrex. Du fil de cuivre dépourvu d'oxygène est utilisé dans les enroulements des deux bobines. Des filières en saphir ont servi pour réduire le diamètre du fil à la valeur désirée.

Dans le cas de la bobine fixe, c'est le pas qui est important; le diamètre est moins important car il n'intervient que dans la correction qui tient compte de la longueur finie de cette bobine. Par contre, dans le cas de la bobine mobile, c'est le diamètre qui est important, mais la valeur du pas ne demande qu'une exactitude relativement faible.

On a admis que le pas de la bobine mobile est la valeur nominale du pas de la rainure rodée, c'est-à-dire $2/3$ mm. Le pas de la bobine fixe a été mesuré par la méthode micrométrique décrite par Curtis, Moon et Sparks [4]. Des mesures longitudinales du pas ont été faites en plusieurs emplacements le long de la bobine pour six positions angulaires. Pendant les mesures la bobine était supportée à ses extrémités. Il a été prouvé que la flexion du tube ainsi supporté n'introduisait pas d'erreur atteignant 10^{-6} .

On a déjà mentionné l'importance du diamètre de la bobine mobile. Bien que le diamètre de la bobine fixe ne nécessite pas l'exactitude la plus haute, on le mesure très soigneusement afin que la bobine puisse servir comme étalon de self-inductance.

La distance entre les couteaux extrêmes du fléau était mesurée par comparaison à un intervalle étalonné d'une règle divisée. Le fléau était monté dans un comparateur destiné à la comparaison des étalons à traits. Dans cet instrument les étalons connus et inconnus sont placés côte à côte sur des bancs distincts et réglables. Ces bancs sont fixés à un chariot qui permet d'amener

l'un ou l'autre des étalons dans le champ de deux microscopes fixes. On a trouvé qu'il était possible de pointer les arêtes des couteaux au moyen des fils du micromètre de la même façon que l'on pointe les graduations d'une règle divisée. La différence entre la distance des couteaux extrêmes et un intervalle connu de la règle divisée a été obtenue par la lecture des micromètres des microscopes. Le rapport de longueur des bras a été déterminé par la pesée de masses connues. Pendant une période de trois ans on n'a trouvé aucune variation significative de ce rapport, que les masses employées fussent 20 ou 3 grammes. Les masses ont été transposées mais, comme la longueur des deux bras diffère de 1,5 %, il fallait laisser sur l'un des plateaux quelques petites masses. En combinant la distance des arêtes des couteaux extrêmes et le rapport des longueurs des bras, on a déterminé la longueur du bras qui doit recevoir la masse équilibrante.

3. LA BALANCE DE COURANT DU NATIONAL BUREAU OF STANDARDS.

Les méthodes et la balance utilisées dans cette mesure absolue de courant ont été décrites lors d'une détermination précédente [2]. La redétermination de l'ampère au moyen de la balance de courant ayant partiellement pour but le contrôle de la stabilité des étalons du N. B. S., il a paru désirable de n'apporter à l'appareillage original que les changements susceptibles d'améliorer la mesure, et de conserver intact l'essentiel. Le seul changement géométrique dans la disposition des bobines a été une modification de l'angle entre les conducteurs des bobines mobile, et fixe, ce qui n'a que peu d'effet sur les forces mutuelles, effet dont on a tenu compte.

La figure 3 représente la balance de courant. Elle comporte une bobine fixe en hélice dans laquelle le courant pénètre au centre de l'hélice et sort par des conducteurs aux extrémités. Une bobine en hélice plus petite est placée au centre de la bobine fixe et attachée au fléau d'une balance. Lorsqu'un courant parcourt la bobine mobile il se produit entre les deux bobines une force qui tend à faire dévier la balance.

La force entre les bobines peut être calculée d'après leurs dimensions géométriques et l'intensité du courant; la force produite par un courant inconnu est déterminée par comparaison avec l'action de la pesanteur sur une masse connue placée sur le plateau de la balance. De cette façon, on peut mesurer l'intensité d'un courant en fonction des unités mécaniques.

Quelques petits changements ont été apportés au mode opératoire antérieur. Par exemple, l'amplitude des oscillations de la

balance a été réglée électriquement et non plus en soufflant de l'air sous les plateaux.

Les piles étalons ont été enlevées de leur emplacement au sous-sol et placées dans un bain d'air maintenu à une température

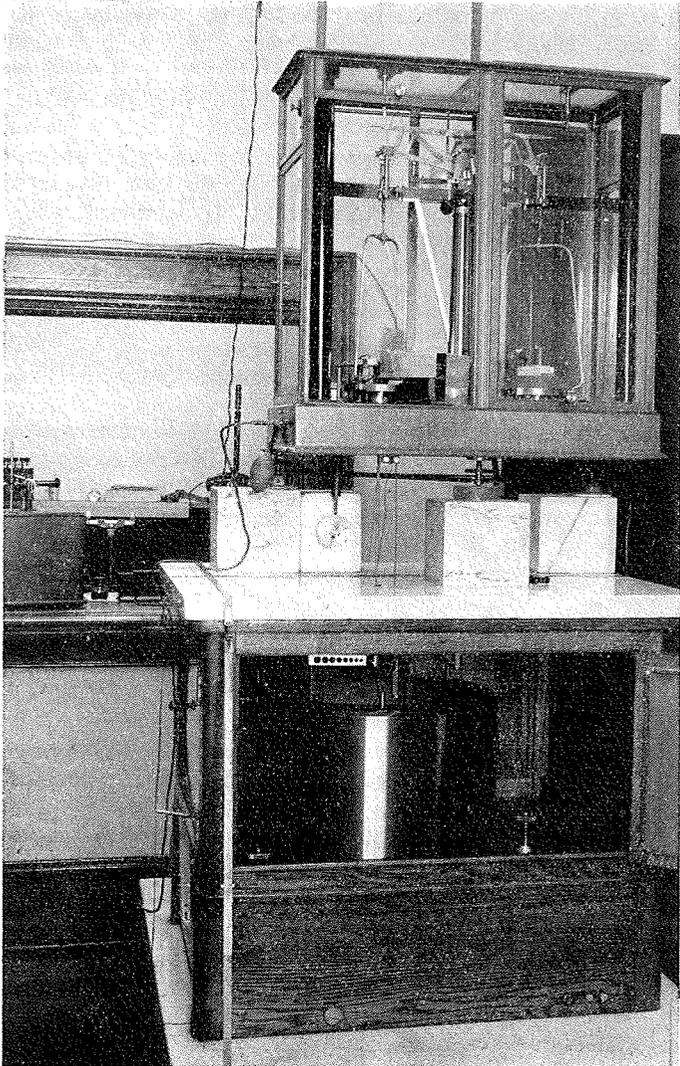


Fig. 3. — La balance de courant du N. B. S.
La bobine mobile est une petite hélice placée au centre
de la grande bobine fixe.

TABLEAU I.

Caractéristiques de la bobine fixe H_1 et de la bobine mobile P_1 .
(Toutes les valeurs sont réduites à 30°C.)

	H_1		P_1	
	1942.	1956.	1942.	1956.
Diamètre extérieur moyen de la bobine..... (cm)	46,260 90	46,261 11	24,513 60	24,513 42
Diamètre du fil..... (cm)	0,069 96	0,069 96	0,051 23	0,051 23
Diamètre moyen de la bobine..... (cm)	46,190 94	46,191 15	24,462 37	24,462 19
Correction de répartition de courant..... (cm)	-0,000 03	-0,000 03	-0,000 04	-0,000 04
Correction de pes-ée..... (cm)	+0,000 02	+0,000 02	0,0	0,0
Diamètre moyen efficace..... (cm)	46,190 93	46,191 14	24,462 33	24,462 15
Longueur axiale de la bobine..... (cm)	27,516 54	27,516 42	2,665 0	2,664 9
Nombre de spires.....	344	-	41	-
Pas moyen..... (cm)	0,079 989 9	0,079 989 6	0,065 000	0,064 998
Résistance de l'enroulement (Ω)				
{ supérieur.....	11,801 6	11,780 6	2,822 0	2,816 9
{ inférieur.....	11,797 4	11,780 8	-	-
Relation résistance-température ($\Omega/^\circ\text{C}$)				
{ supérieur ..	0,044 3	0,043 6	0,010 79	0,010 34
{ inférieur ...	0,044 3	0,044 2	-	-
Coefficient de dilatation thermique..... ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	3,6	3,5	3,9	3,7
Tension d'enroulement..... (N)	98,1	-	29,4	-

constante de 34° C. Cette disposition a servi aussi pour l'électrodynamomètre de Pellat et rendait possible une meilleure régulation de la température des piles, d'où une meilleure précision de leur force électromotrice.

Ce changement de la température des piles a aussi changé leur force électromotrice et il a fallu diminuer le poids de platine qui était placé sur la balance dans le travail antérieur.

Les élongations maximum de la balance étaient observées par réflexion d'un faisceau de lumière sur un miroir monté sur le fléau et lues sur une échelle située dans la salle d'observation. On avait utilisé précédemment un dispositif dans lequel le faisceau de lumière était réfléchi deux fois dans un prisme mobile, afin d'accroître la sensibilité de la balance. A cause de difficultés de mise au point du repère sur l'échelle, on a préféré remplacer le prisme à double réflexion par un simple miroir afin d'obtenir une image plus fine. La sensibilité de la balance est passée de 1,2 mg/cm à 2,33 mg/cm, mais la sécurité des lectures a été améliorée.

Les dimensions linéaires des bobines de la balance de courant ont été remesurées, généralement par les méthodes déjà décrites [2].

TABLEAU II.

Calcul des résultats définitifs.

($g = 980,081 \text{ cm/s}^2$).

	1942.	1956.
Masse étalon (cylindre de platine)..... (g)	1,427 655	1,425 569
Correction de poussée de l'air..... (g)	-0,000 077	-0,000 079
Correction due aux conducteurs :		
Bobine mobile..... (g)	-0,000 068	-0,000 044
Bobine fixe..... (g)	-0,000 018	-0,000 022
Sensibilité de la balance multipliée par δ (*).. (g)	+0,000 222	-0,000 031
Correction due aux gradients de température dans les noyaux des bobines..... (g)	-0,000 014	-0,000 014
Masse de compensation corrigée, M..... (g)	1,427 700	1,425 379
Force mesurée, $M.g = F_M$ (dynes)	1 399,262	1 396,987
Force calculée pour l'unité de courant, à 30°C, F_C (dynes)	1 348,393	1 348,360 5
Courant équivalent, $I_{\text{abs}} = \sqrt{\frac{F_M}{F_C}}$ (A abs.)	1,018 688	1,017 872 0
Force électromotrice des piles étalons.... (V)	1,018 702	1,017 870 3
Résistance étalon R_1 (Ω)	1,000 015	1,000 007 6
Résistance étalon R_2 (Ω)	1,000 019	1,000 005 6
Courant équivalent..... (A _(NBS))	1,018 686	1,017 863 0
$\frac{I_{\text{abs}}}{I_{\text{NBS}}}$	1,000 002	1,000 009

(*) δ est la variation de la lecture de l'échelle à l'inversion du courant.

Pour la comparaison du travail actuel et du travail de 1942, les deux déterminations sont rapportées, dans les tableaux I et II, aux mêmes étalons électriques et à la même valeur de l'accélé-

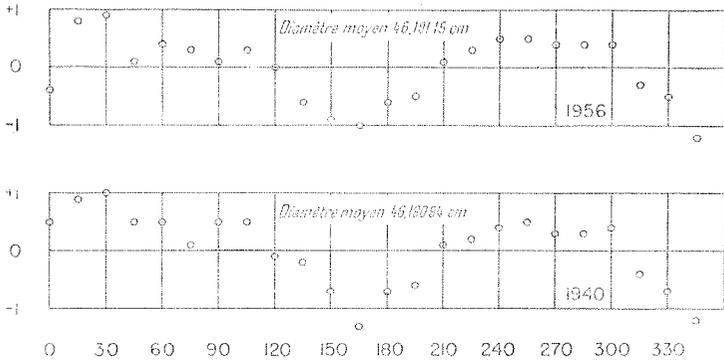


Fig. 4. — Comparaison des mesures du diamètre de la bobine fixe de la balance de courant du N. B. S., en 1940 et en 1956.

En abscisses : numéro d'ordre des spires;
En ordonnées : écarts, en micron, par rapport au diamètre moyen.

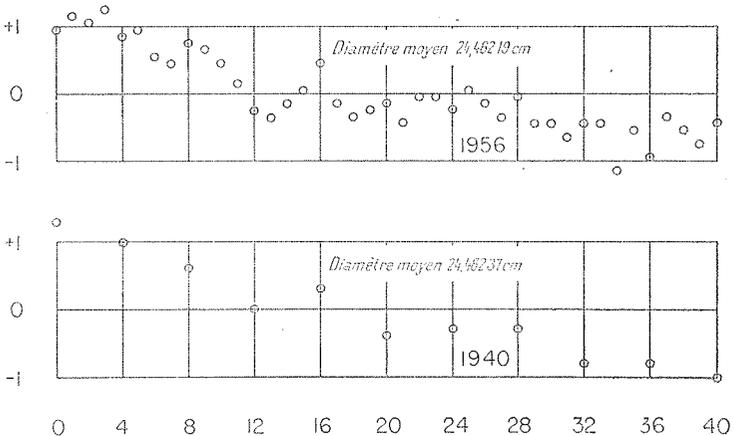


Fig. 5. — Mesures du diamètre de la bobine mobile de la balance de courant du N. B. S., en 1940 et en 1956.

En abscisses : numéro d'ordre des spires;
En ordonnées : écarts, en micron, par rapport au diamètre moyen.

ration due à la pesanteur. Les valeurs mesurées du courant sont exprimées en « ampère NBS », qui représente dans cette Note le courant mesuré par rapport aux étalons actuels de résistance

et de force électromotrice du N. B. S. tels qu'ils sont utilisés depuis 1948. La valeur de l'accélération due à la pesanteur repose sur la réduction de Dryden [5] et sur une détermination gravimétrique faite au N. B. S. par le U. S. Geological Survey. Pour rendre la comparaison plus complète, on a appliqué aux résultats de 1942 et de 1956 indiqués dans cette Note, les corrections se rapportant à la nouvelle mesure du diamètre, à la répartition du courant, et au gradient de température. Le tableau I permet de comparer les résultats obtenus à ces deux époques pour les dimensions des hélices et le tableau II montre le calcul des résultats définitifs. La similitude entre les deux séries de mesures de diamètre sur les bobines fixe et mobile et les changements du diamètre moyen sont apparents sur les figures 4 et 5.

4. RÉSULTATS.

En fonction des unités telles qu'elles sont conservées au National Bureau of Standards au moyen de piles étalons et de résistances étalons, les résultats de ces deux mesures absolues de courant sont les suivants :

Balance de courant N. B. S. :

$$1 \text{ ampère NBS} = 1,000\ 009 \pm 0,000\ 006 \text{ ampère absolu ;}$$

Électrodynamomètre de Pellat :

$$1 \text{ ampère NBS} = 1,000\ 012 \pm 0,000\ 008 \text{ ampère absolu,}$$

les incertitudes indiquées étant les erreurs probables. En fonction des unités conservées par le Bureau International des Poids et Mesures, les résultats seraient les mêmes à très peu de chose près. Les rapports préliminaires reçus du Bureau International pour les intercomparaisons de 1955 montrent que l'unité conservée au Bureau International est égale à celle du N. B. S. à mieux que 10^{-6} , pour l'ohm comme pour le volt.

L'excellent accord entre les deux méthodes est évidemment agréable. Cependant il pourrait être quelque peu fortuit, puisque les erreurs probables estimées pour les deux méthodes, en laissant de côté l'incertitude sur l'accélération due à la pesanteur qui est commune aux deux méthodes, sont respectivement cinq et sept millionièmes. La valeur moyenne des deux résultats indique que l'ampère du N. B. S. diffère maintenant de l'ampère absolu de $(10 \pm 5) \cdot 10^{-6}$. Le nouveau résultat à la balance de courant diffère de celui obtenu en 1942 de $7 \cdot 10^{-6}$. S'il fallait admettre que la différence est uniquement due à une variation des étalons, nous serions amenés à supposer une augmentation du volt du N.B.S. de $7 \mu\text{V}$, une diminution de l'ohm du N. B. S. de $7 \mu\Omega$, ou des

variations plus petites affectant à la fois les deux unités. Une diminution de 7.10^{-6} de la valeur des résistances semblerait plus probable qu'une augmentation équivalente de la force électromotrice des piles étalons, car on croit généralement qu'une lente dérive d'un groupe de piles saturées serait presque certainement dans le sens d'une diminution. Cependant, les résultats expérimentaux [6] rendent extrêmement improbable un changement de l'unité de résistance. De nouveaux renseignements sur ce sujet sont attendus de la troisième détermination absolue de résistance actuellement en cours par la méthode de Wenner. Tant que cette dernière détermination ne sera pas achevée, la seule conclusion possible est que l'écart de 7.10^{-6} est la somme des changements des deux unités et des incertitudes de la répétition des mesures à la balance de courant.

(Mai 1957.)

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] PELLAT (M. H.), *J. Phys.*, 6, 1887, p. 175; *Bull. Soc. Intern. Électriciens*, 2^e série, 8, 1908, p. 573.
 - [2] CURTIS, DRISCOLL, CRITCHFIELD, *J. Research N. B. S.*, 28, 1942, p. 133 (RP 1449).
 - [3] THOMAS, DRISCOLL, HIPPLE, *J. Research N. B. S.*, 44, 1950, p. 569 (RP 2104).
 - [4] CURTIS, MOON, SPARKS, *J. Research N. B. S.*, 21, 1938, p. 375 (RP 1137).
 - [5] DRYDEN (H. L.), *J. Research N. B. S.*, 29, 1942, p. 303 (RP 1502).
 - [6] THOMAS, PETERSON, COOTER, KOTTER, *J. Research N. B. S.*, 43, 1949, p. 291 (RP 2029).
- RAYNER, *Proc. Inst. Elect. Engrs.*, 101, 1954, p. 250 (Monograph 95).

ANNEXE E 5.

National Research Council (Canada).

DÉTERMINATION ABSOLUE DE L'UNITÉ DE RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE

Par M. ROMANOWSKI et N. OLSON.

Une Note précédente, rédigée en octobre 1954 et parue dans les *Procès-Verbaux du C. I. P. M.*, 24, 1954, p. 134, exposait les grandes lignes du rôle que l'étalon d'inductance (dont la construction venait alors d'être terminée) devait jouer dans la détermination de l'unité de résistance électrique.

Au cours des trois années qui viennent de s'écouler de nombreux et délicats problèmes de métrologie électrique, posés par le pont à fréquence, ont été résolus. Les problèmes de cette sorte peuvent être divisés en deux catégories :

- a. ceux qui sont posés par la mesure des termes principaux de l'équation du pont;
- b. ceux qui sont posés par l'évaluation des termes secondaires.

Dans la première catégorie figurent, d'une part, la mesure de la résistance de l'enroulement primaire de l'inducteur de 20 mH et, d'autre part, la mesure de la résistance du shunt placé entre les bornes de cet enroulement.

La mesure du shunt (qui est transportable) est faite au moyen du comparateur de résistance (muni de ses décades étalons). On a mesuré de façon analogue un étalon de substitution dont la valeur est nominale égale à celle de l'enroulement mentionné ci-dessus. On termine la mesure en comparant l'étalon de substitution et l'enroulement proprement dit au moyen d'un pont de Wheatstone spécial, adjoint au pont à fréquence.

Toutes les résistances sont faites en câble de manganine composé de fils très fins. On a donc admis que les résistances sont pratiquement égales, qu'elles soient mesurées en courant continu ou en courant alternatif de 100 Hz.

Dans la deuxième catégorie figurent surtout les capacités propres des enroulements secondaire et primaire des diverses bobines. Toutes les mesures sont faites au moyen du pont de Hartshorn. Les valeurs des capacités sont établies de proche en proche, en partant d'un étalon de capacité propre. Ce dernier est un inducteur dont le primaire et le secondaire sont des bobines à simple couche. La capacité propre de la simple couche est la seule qui ait été mesurée par la méthode de résonance.

La connaissance précise des capacités des enroulements est tout particulièrement nécessaire pour traiter correctement l'opération de l'addition des inductances mutuelles. On effectue expérimentalement cette addition au moyen d'un inducteur de passage, inspiré par celui de Campbell, mais possédant trois hélices primaires et deux bobines secondaires. Ces bobines secondaires sont connectées au pont de Hartshorn, d'abord individuellement et ensuite ensemble, après avoir été mises en série. Toutes corrections dues aux capacités étant faites, le rapport entre la valeur finale de l'inducteur en manganine (20 mH) et la valeur de l'étalon (10 mH) diffère de la valeur idéale 2 de quelques millièmes à peine.

Il reste à signaler que les mesures des inductances résiduelles, en particulier de celle de l'ohm qui figure dans le pont à fréquence, sont faites avec un pont de Maxwell-Wien. Chaque résistance à étudier est comparée à un anneau en fil de manganine de mêmes caractéristiques nominales. L'inductance de l'anneau est calculée à partir de ses dimensions géométriques.

Le pont a commencé à donner des résultats préliminaires satisfaisants au printemps 1956. Il a été modifié et amélioré au cours de l'hiver suivant, tandis que des modifications importantes étaient apportées au bâtiment lui-même et à ses installations de climatisation. Les mesures finales ont eu lieu en avril 1957. Le pont a fait preuve d'une excellente stabilité et fidélité : les déterminations individuelles sont en grande majorité contenues dans un intervalle de $\pm 20 \mu\Omega$ et un petit nombre d'entre elles dépasse ces limites. La répartition des écarts est d'ailleurs très voisine de la courbe de Gauss.

Le courant d'alimentation (100 Hz) était fourni par un oscilateur à quartz. La fréquence était comparée périodiquement à celle de l'étalon de fréquence du National Research Council. Elle s'est montrée toujours très stable au cours des mesures et si proche de sa valeur nominale qu'aucune correction n'a été nécessaire. Les installations du pont comportent tous les dispositifs d'usage pour l'amplification, le filtrage et la détection. L'appareil détecteur final était un oscilloscope cathodique.

L'écart entre l'unité ainsi obtenue et l'unité telle qu'elle résulte des travaux de comparaison effectués au Bureau International,

ne pourra être établi qu'après les comparaisons de l'été 1957. Compte tenu des résultats de 1955 (*Procès-Verbaux du C. I. P. M.*, 25, 1956, p. 128) qui indiquent que l'unité de résistance canadienne est de 5 millièmes inférieure à celle du B. I. P. M. (et aussi à celle du N. B. S.), nous pouvons conclure que l'ohm absolu déterminé à Ottawa ne saurait différer de l'ohm adopté sur le plan international que de quelques millièmes.

La discussion de la précision n'est pas encore, faute de temps, complètement terminée. Mais, d'ores et déjà, il semble que notre conclusion ne sera pas très différente de celles des autres Laboratoires nationaux, c'est-à-dire que l'erreur serait égale à environ 20 millièmes.

Nous suggérons donc d'attendre que toutes les déterminations actuellement en cours dans les divers pays soient achevées et publiées, avant de décider si les méthodes les plus modernes révèlent une tendance systématique quelconque.

(Mai 1957.)

Institut de Métrologie D. I. Mendéléev (U. R. S. S.).

TRAVAUX DE L'INSTITUT DE MÉTROLOGIE
SUR L'ÉTABLISSEMENT DES ÉTALONS
DES UNITÉS ÉLECTRIQUES ABSOLUES
ET PROPOSITIONS AU COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ

Par E. CHRAMKOV.

(Traduction remise.)

En 1932, l'Institut de Métrologie de l'U. R. S. S. a présenté au Comité Consultatif d'Électricité, conformément à la décision prise par le Comité International des Poids et Mesures, le programme de ses travaux sur la réalisation des unités électriques et magnétiques absolues, en vue du passage des unités internationales aux unités absolues (1). Ce programme proposait, en particulier, les travaux suivants :

1. L'établissement de l'étalon de l'unité d'inductance, le henry absolu;
2. L'établissement de la balance de courant comme étalon de l'ampère absolu.

En 1938, l'Institut de Métrologie commença les travaux sur la réalisation des étalons des unités électriques absolues. Vers le début de la deuxième guerre mondiale on n'exécuta que le premier modèle de la balance de courant (ultérieurement remplacé par une construction plus parfaite). L'état de guerre interrompit ces travaux et ce n'est qu'en 1946 qu'ils furent repris.

Depuis cette date, on a exécuté toute une série de recherches

(1) *Mémoires de la Chambre Centrale des Poids et Mesures de l'U. R. S. S., présentés au Comité Consultatif d'Électricité et de Photométrie, n° 100, Leningrad, 1932.*

scientifiques, de travaux de construction et de production, ce qui a conduit à l'établissement des étalons suivants des unités électriques absolues.

1. Étalon de l'ampère absolu sous la forme de la balance de courant (électrodynamomètre) composée d'un solénoïde fixe muni d'un enroulement à une seule couche, de deux autres solénoïdes mobiles connectés d'une manière rigide, placés à l'intérieur du solénoïde fixe, et d'un solénoïde mobile extérieur.

2. Étalon de l'unité d'inductance (henry), sous la forme de quatre bobines munies d'un enroulement à une seule couche bobiné sur un cylindre en pyrex et en quartz.

La valeur de l'inductance de chaque bobine est calculée d'après ses dimensions géométriques et le nombre de spires de la bobine.

3. Établissement des circuits et des dispositifs de mesure pour la réalisation de l'unité de résistance électrique à partir des étalons d'inductance et des étalons de fréquence en courant alternatif à la fréquence de 1 000 Hz.

4. Établissement d'un dispositif de mesure, d'après le schéma de Wenner, pour la réalisation de l'unité de résistance à partir de l'inductance mutuelle et de la fréquence.

Les cinq rapports suivants (Annexes E 7 à E 11) résument les travaux sur les étalons et les dispositifs de mesure, ainsi que les résultats obtenus.

On décrit aussi la méthode pour la réalisation de l'unité de capacité par un groupe de condensateurs construits à l'Institut de Métrologie, dont la valeur est déterminée en fonction des étalons d'inductance et de résistance.

En vue d'obtenir une précision élevée dans la comparaison des étalons de force électromotrice (éléments normaux), on a construit un nouveau comparateur (*voir* Annexe E 11, p. E 75) basé sur la méthode de substitution dans laquelle les éléments à comparer sont alternativement opposés à un élément normal auxiliaire (*tare*). Ce comparateur est aussi utile pour la comparaison des éléments étalons.

En 1948 on a décidé, comme on le sait, le passage des unités internationales aux unités absolues par le calcul des valeurs des étalons des laboratoires nationaux en utilisant les facteurs de conversion adoptés par accord international. Les valeurs de ces facteurs ont été déterminées d'après les mesures absolues effectuées alors dans certains Laboratoires nationaux représentés au Comité Consultatif d'Électricité et compte tenu des rapports oraux montrant que ces Laboratoires avaient effectué ou effectuaient des travaux en vue de la réalisation des unités absolues.

On est fondé à supposer qu'à sa session de 1957 le Comité

Consultatif aura de nouveaux résultats sur les unités électriques absolues.

Conformément à ce programme de travail et en vue d'accroître la précision de la valeur des unités absolues, l'Institut de Métrologie soumet à l'examen du Comité Consultatif les propositions suivantes :

PROPOSITIONS.

1. Recommander aux laboratoires nationaux qui ont les moyens nécessaires d'entreprendre simultanément, d'après le programme élaboré par le Comité Consultatif d'Électricité, les travaux sur la détermination absolue des valeurs des étalons des unités de résistance électrique, de force électromotrice, de capacité, d'inductance, et de soumettre les résultats obtenus au cours de la session du Comité Consultatif en 1959.

2. Entreprendre dans les laboratoires nationaux des comparaisons mutuelles des étalons des unités absolues de résistance, de force électromotrice et de capacité.

Pour les comparaisons mutuelles des étalons de l'unité de capacité, on peut utiliser les condensateurs de la construction de l'Institut de Métrologie.

(Mai 1957.)

ANNEXE E 7.

Institut de Métrologie D. I. Mendéléev (U. R. S. S.).

BALANCE DE COURANT
ET ÉTABLISSEMENT DE LA VALEUR
DE L'ÉTALON DU VOLT (*)

Par S. GORBATZEVITCH, V. MULLER et P. LOUKIANOV.

(Traduction remise.)

En 1955, l'Institut de Métrologie a terminé les travaux sur la mesure absolue de l'intensité de courant et l'établissement de la valeur de l'étalon du volt. Ces travaux se divisent en deux parties :

- a. Élaboration, construction, étude de la balance de courant;
- b. Détermination de la force électromotrice des éléments étalons normaux par la balance de courant.

BALANCE DE COURANT.

Les parties principales de la balance de courant sont : une balance et un système électrodynamique composé d'un seul solénoïde fixe SJ et de deux solénoïdes mobiles SM (M_1 et M_2) connectés d'une manière rigide (*fig. 1*).

La balance de courant a été établie pour une portée de 3 kg (la charge réelle est presque deux fois moindre). La longueur du fléau est de 34 cm; ce fléau porte une échelle avec cavaliers. Les couteaux sont en bronze au béryllium et les plans en rubis. Tous les éléments sont fabriqués en matériaux dont la susceptibilité magnétique relative est inférieure à 10^{-5} .

Des rubans élastiques en argent, d'une longueur d'environ 300 mm et de $(1 \times 0,03)$ mm² de section, servent à amener

(*) Résumé de l'article en langue russe publié dans *Trud. Inst. Metrologii*, 1957, n° 31 (81), p. 5-18.

le courant aux solénoïdes mobiles. C'est un point essentiel du système.

Les parties auxiliaires de la balance de courant sont le système optique, le système de leviers servant à effectuer la mise en place et l'enlèvement de la charge équilibrante, et le dispositif réfri-

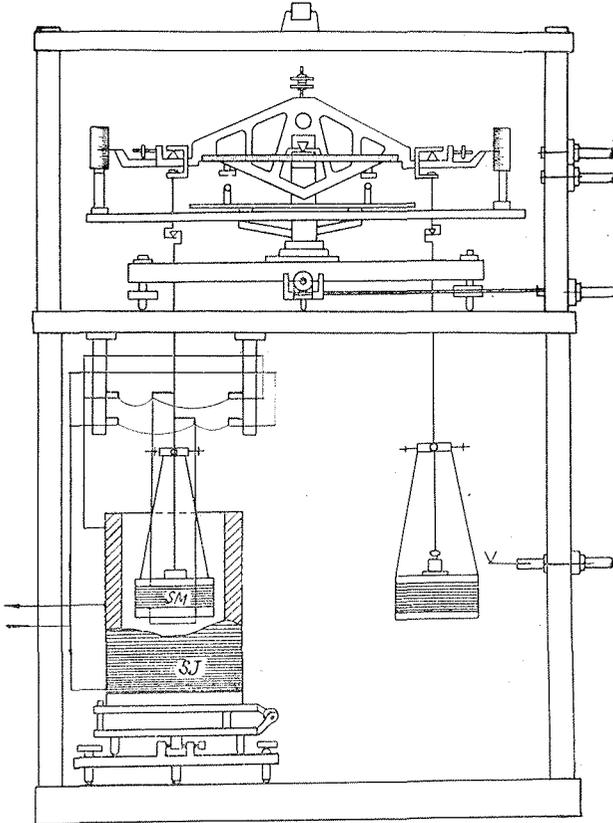


Fig. 1.

gérant pour la chaleur dégagée par les enroulements des solénoïdes.

Le solénoïde fixe est installé sur un double support muni d'engrenages hélicoïdaux, ce qui permet de régler le système électrodynamique dans trois directions perpendiculaires.

L'aspect général de la balance de courant dans sa cage est représenté à la figure 2.

Un dispositif spécial a été conçu et construit pour la mesure des diamètres des solénoïdes. On a effectué la mesure du diamètre

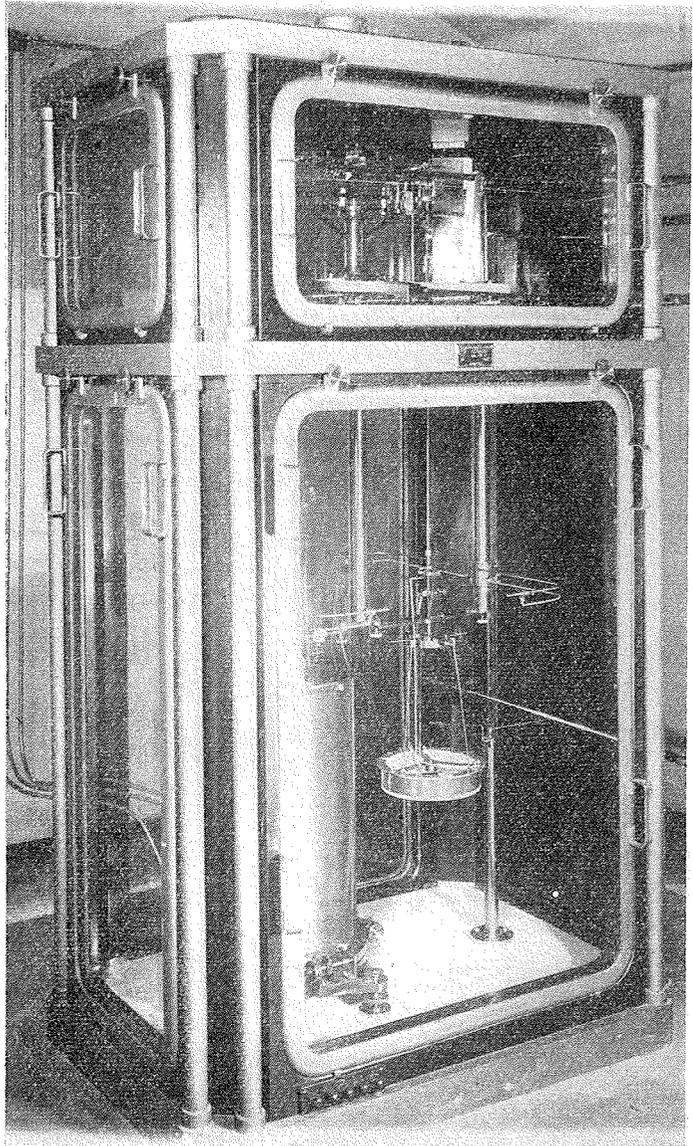


Fig. 2.

du solénoïde fixe pour six sections axiales et en 18 points des génératrices de chaque section. Les diamètres des solénoïdes

mobiles ont été mesurés pour 12 sections axiales, en 5 points des génératrices de chaque section.

La hauteur de l'enroulement a été déterminée par comparaison avec le Mètre étalon de travail N° R-86 sur une machine à mesurer de la Société Genevoise.

D'après les mesures effectuées, on a obtenu pour les dimensions géométriques des solénoïdes les valeurs suivantes :

TABLEAU I.

	Solénoïde fixe (S ₁).	Solénoïde mobile (M ₁).	Solénoïde mobile (M ₂).
<i>r</i> (en cm).....	13,540 6 ₃	10,721 3 ₀	9,319 2 ₀
<i>l</i> (en cm).....	39,984 2 ₃	4,627 2 ₃	4,626 5 ₇
<i>w</i>	400	58	58

où *r* = rayon moyen du solénoïde, compte tenu de l'épaisseur du fil;

l = hauteur de l'enroulement;

w = nombre de spires.

En ce qui concerne la constante du système électrodynamique, on l'a calculée séparément pour chaque combinaison des solénoïdes SJ — M₁ et SJ — M₂ d'après les formules connues [1], [2].

La constante du système électrodynamique, compte tenu des corrections azimutale et axiale, a été trouvée égale

$$\text{à } 386\ 055,5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}.$$

L'étude de la balance de courant a permis de révéler les causes provoquant les erreurs de mesure. L'influence de certaines de ces causes a été éliminée par une méthode spéciale de mesure, par exemple celle du pesage; l'influence des autres causes a été évaluée quantitativement et les résultats sont donnés au tableau II.

L'erreur relative de l'intensité de courant déterminée par la balance a été trouvée égale à

$$\Delta_1 = \frac{\delta I}{I} = \frac{1}{2} \sqrt{\Sigma \Delta_i^2} \simeq 4 \cdot 10^{-6}.$$

En 1956, on a construit un nouveau solénoïde mobile extérieur en vue de perfectionner l'installation de la balance de courant; on a aussi préparé et ajusté un dispositif optique pour la détermination des variations des diamètres du solénoïde lors de la mesure. On a de plus construit et monté un dispositif pour l'enregistrement photographique des oscillations du fléau de la balance.

Les paramètres géométriques du nouveau solénoïde mobile (M_3) sont :

rayon moyen	= 16,336 3 ₈ cm;
hauteur de l'enroulement	= 8,096 3 ₀ cm;
nombre de spires	= 77.

La constante du système électrodynamique formé par ce nouveau solénoïde extérieur et par le solénoïde ancien est égale à $376\ 120,5 \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2}$.

TABLEAU II.

Source des erreurs.	Valeur numérique.
Incertitude de la détermination des rayons du solénoïde fixe (SJ).....	$\Delta_{rSJ} = 3 \cdot 10^{-6}$
Incertitude de la détermination des rayons du solénoïde mobile (M_1).....	$\Delta_{rM_1} = 3 \cdot 10^{-6}$
Incertitude de la détermination des rayons du solénoïde mobile (M_2).....	$\Delta_{rM_2} = 2 \cdot 10^{-6}$
Incertitude des dimensions axiales du solénoïde fixe (SJ).....	$\Delta_{lSJ} = 2 \cdot 10^{-6}$
Incertitude des dimensions axiales du solénoïde mobile (M_1).....	$\Delta_{lM_1} = 1,3 \cdot 10^{-6}$
Incertitude des dimensions axiales du solénoïde mobile (M_2).....	$\Delta_{lM_2} = 0,7 \cdot 10^{-6}$
Erreur de circularité du solénoïde fixe (SJ).	$\Delta_c = 2 \cdot 10^{-6}$
Influence du champ magnétique du contour amenant le courant.....	$\Delta_k = 2 \cdot 10^{-6}$
Incertitude sur la valeur adoptée pour l'accélération due à la pesanteur.....	$\Delta_g = 4 \cdot 10^{-6}$
Incertitude de la détermination de la masse des poids.....	$\Delta_m = 1,3 \cdot 10^{-6}$

La présence du solénoïde extérieur et de deux solénoïdes intérieurs connectés d'une manière rigide, permet d'effectuer les mesures dans trois systèmes électrodynamiques dont deux sont indépendants. Le dispositif pour l'enregistrement photographique des oscillations se compose d'une partie optique et d'un mécanisme pour le déroulement des films.

Les photogrammes permettent d'obtenir les données pour le calcul des points d'équilibre de la balance et d'éliminer les erreurs individuelles d'observation.

DÉTERMINATION DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE
DES ÉLÉMENTS ÉTALONS NORMAUX
PAR LA BALANCE DE COURANT.

Les travaux sur la détermination de la force électromotrice des éléments normaux à l'aide de la balance de courant ont permis

d'élaborer la méthode pour la détermination de la force électromotrice des éléments normaux étalons et pour la détermination de la valeur primaire du volt. Les principes essentiels de cette méthode sont :

a. La détermination de la force électromotrice E_1, E_2, \dots, E_n de quelques éléments normaux étalons (quatre dans notre cas), que nous appelons « éléments de comparaison ».

b. En partant de la valeur moyenne E_m des éléments de comparaison on établit, par des comparaisons mutuelles de ces éléments, des valeurs « précisées » E'_1, E'_2, \dots, E'_n , de telle sorte que la somme $\sum_{i=1}^{i=n} E_i$ obtenue d'après les résultats de la mesure à la

balance de courant soit répartie sur chacun des éléments de comparaison conformément à leurs différences réelles.

Cette nécessité résulte de ce que la différence $(E_i - E_k)$ est moins sûre que $(E'_i - E'_k)$, où i et k prennent les valeurs de 1 à n pour $i \neq k$.

c. La comparaison des m éléments de l'étalon primaire du volt avec les n éléments de comparaison. On obtient ainsi nm valeurs de même poids dont la moyenne, E'_m , est calculée d'après la formule

$$E'_m = \frac{\Sigma E'_{1m} + \Sigma E'_{2m} + \dots + \Sigma E'_{nm}}{nm}$$

La valeur E'_m est aussi celle de l'étalon primaire du volt.

Les résultats des comparaisons mutuelles sont donnés dans le tableau III. Les erreurs des valeurs précisées de la force électromotrice indiquées dans ce tableau sont les erreurs résiduelles déterminées d'après les résultats des comparaisons mutuelles et les mesures à la balance de courant, sans tenir compte des erreurs systématiques possibles.

TABLEAU III.

N ^{os} des éléments.	Force électro- motrice.	Résultats des comparaisons mutuelles. (μ V).	Erreur quadra- tique moyenne du résultat S_b (μ V).	Résultats des mesures à la balance de courant		Valeurs précisées de la force électromotrice à 20°C. (μ V).	S_y (μ V).
				Force électromotrice à 20°C. (V).	S_i (μ V).		
2733...	E_1	$E_2 = E_1 - 0,33$	0,31	1,018 614	1,9	1,018 617	1
2291...	E_2	$E_3 = E_1 + 3,63$	0,39	621	2,9	616	1
5643...	E_3	$E_4 = E_1 + 1,34$	0,23	621	1,7	620	1
5646...	E_4	$E_4 = E_2 + 1,69$	0,16	615	1,6	618	1
		$E_3 = E_2 + 3,92$	0,38				
		$E_1 = E_3 - 2,46$	0,48				

Comme les erreurs des valeurs précisées de la force électromotrice ont deux origines, dont l'une n'est pas liée aux mesures à la balance de courant, elles ne sont pas introduites dans les erreurs données ci-dessus pour la détermination de l'intensité de courant.

Pour calculer l'erreur avec laquelle on apprécie l'unité de force électromotrice à réaliser, il est nécessaire de prendre en considération aussi bien les erreurs indiquées ci-dessus des comparaisons mutuelles et des mesures au moyen de la balance de courant, que l'erreur des déterminations absolues d'intensité de courant et celle de la bobine-étalon de résistance.

Pour calculer l'erreur limite de la réalisation de l'unité de force électromotrice nous devons tenir compte des erreurs limites particulières suivantes (*voir* tableau III) :

- 1° Erreur sur la mesure de l'intensité de courant, égale à $4 \cdot 10^{-6}$;
- 2° Erreur sur la valeur de l'étalon de résistance, égale à $1 \cdot 10^{-6}$;
- 3° Erreur résiduelle pour la mesure à la balance de courant et pour les comparaisons mutuelles des éléments de comparaison, égale à $5 S_r = 5 \cdot 10^{-6}$.

L'erreur limite pour la réalisation de l'unité de force électromotrice, calculée d'après la loi d'accumulation des erreurs, sera alors égale à $7 \cdot 10^{-6}$ ou $7 \mu\text{V}$.

La valeur E'_m du groupe-étalon primaire de l'unité de force électromotrice a été trouvée égale à $1,018\ 608 \pm 7 \cdot 10^{-6}$ V.

Vers la fin de 1956, nous avons effectué des mesures de la force électromotrice des éléments normaux en utilisant le nouveau solénoïde extérieur mobile M_3 en vue de comparer les résultats obtenus pour chacun des trois systèmes électrodynamiques, SJ — ($M_1 + M_2$), SJ — M_3 , et SJ — ($M_1 + M_2 + M_3$). Les résultats préliminaires montrent que la divergence des résultats ne dépasse pas $5 \mu\text{V}$.

(Mai 1957.)

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] SNOW (C.), The attraction between coils in the Rayleigh current balance, *J. Research N. B. S.*, 11, 1933, p. 681.
- [2] JANOVSKI (B.), GORBATZEVITCH (S.), VOLKOV (N.), Mesures absolues de l'intensité de courant, *Trud. Inst. Metrologii*, n° 15 (75), 1953.

ANNEXE E8.

Institut de Métrologie D. I. Mendéléév (U. R. S. S.).

RÉALISATION DE L'UNITÉ ABSOLUE DE RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE (*)

Par I. KROTKOV, S. GORBATZEVITCH,
B. JANOVSKI et N. AMATOUNI.

(Traduction remise.)

Les travaux pour la réalisation de l'unité de résistance électrique par une détermination absolue ont été exécutés à l'Institut de Métrologie par deux méthodes tout à fait différentes. La première méthode est basée sur la mesure de la résistance par les étalons d'inductance et de fréquence; la seconde repose sur le calcul de l'inductance mutuelle et la mesure de la fréquence (méthode de Wenner).

RÉALISATION DE L'UNITÉ DE RÉSISTANCE PAR LES ÉTALONS D'INDUCTANCE ET DE FRÉQUENCE.

Cette méthode a été mise en œuvre à l'aide d'un circuit électrique en courant alternatif.

L'analyse des propriétés générales des circuits de mesure a permis de trouver quelques circuits dont les propriétés dépendent de la fréquence utile et qui se sont révélés propres à résoudre ce problème. On a choisi finalement deux schémas de circuit (*fig. 1* et *2*), désignés plus loin par schéma X et par schéma T. Le premier schéma (*fig. 1*) a été donné pour la première fois par Wien; le second (*fig. 2*) est mentionné dans le travail de Tuttle [2].

Dans la littérature nous n'avons pas trouvé d'indications sur l'emploi de ces schémas pour la réalisation de l'unité de résistance.

(*) Résumé des articles en langue russe publiés dans *Trud. Inst. Metrologii*, 1957, n° 31 (81), p. 21 et 32.

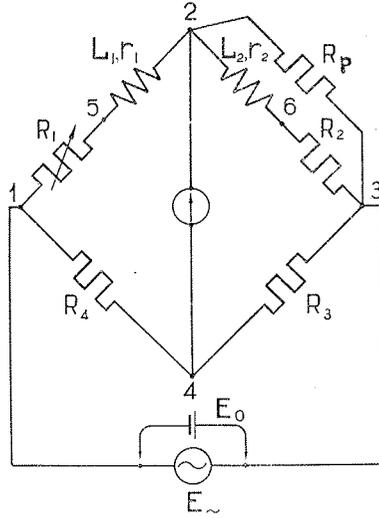


Fig. 1.

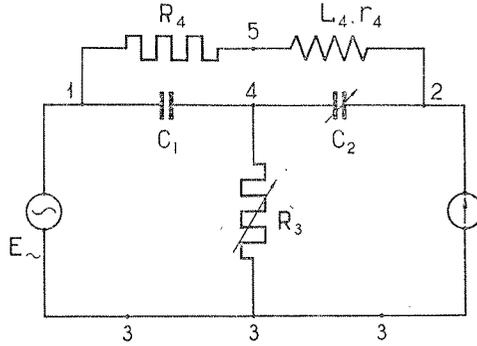


Fig. 2.

En faisant abstraction des corrections, on montre [3] que si les circuits sont en équilibre, leurs éléments sont liés par les relations suivantes :

$$(1) \quad \begin{cases} \omega L_1 = \sqrt{(R_1 - R'_1)(R''_1 - R_1)} & (\text{fig. 1}), \\ R_2 R_3 = \frac{k}{(1+k)^2} \omega^2 L_1^2 & (\text{fig. 2}), \end{cases}$$

où R_1 = valeur de la résistance R_1 à l'équilibre en courant alternatif;

R'_1 = valeur de la résistance R_1 à l'équilibre en courant continu, tous les éléments du circuit étant restés les mêmes;

R_1'' = valeur de la résistance R_1 en courant continu après mise en circuit de la bobine L_2 .

$$k = \frac{C_2}{C_1} \text{ (fig. 2); d'ordinaire } k \simeq 1.$$

Si l'on compare ensuite la résistance R_X mesurée en courant continu avec R_1 , R_1' et R_1'' , ainsi qu'avec R_3 et R_4 , nous avons alors, d'après (1),

$$(2) \quad \begin{cases} R_X = R_X^0 = \frac{\omega L_1}{\sqrt{(\beta_1 - \beta_2)(\beta_3 - \beta_1)}} & \text{(fig. 1),} \\ R_X = R_X^0 = \frac{\sqrt{k}}{(1+k)} \frac{\omega L_1}{\sqrt{\delta_3 \delta_4}} & \text{(fig. 2),} \end{cases}$$

où β_1 , β_2 , β_3 sont les rapports des résistances R_1 , R_1' , R_1'' à R_X (dans notre cas, par exemple, ces rapports de comparaison sont $\beta_1 \approx 2,9$, $\beta_2 \approx 1,8$, $\beta_3 \approx 5,0$) et δ_3 , δ_4 les rapports des résistances R_3 et R_4 à R_X (dans notre cas $\delta_3 \approx \delta_4 \approx 1$). On peut alors, d'après (2), déterminer une valeur approchée des résistances comparées.

Si nous prenons en considération les paramètres résiduels de quelques éléments des circuits et les fuites entre les parties du schéma, il faut ajouter aux relations (2) les termes correctifs (3),

$$(3) \quad \begin{cases} R_X = R_X^0(1 + \varepsilon_X) & \text{(fig. 3),} \\ R_X = R_X^0(1 + \varepsilon_r) & \text{(fig. 4).} \end{cases}$$

Conformément aux schémas de principe (fig. 1 et 2) on a réalisé les circuits de mesure (fig. 3 et 4) qui ont un système spécial de blindage. Les résistances fixes sont enroulées sur des lames de mica. Dans la résistance variable on ajoutait successivement des fils calibrés à inductance constante. Pour les capacités C_1 et C_2 on employait des condensateurs au mica.

L'emploi d'un système thermostatique assurait une stabilité de la température de l'air à $\pm 0,1$ degré.

Les circuits ont été alimentés par un groupe de générateurs à quartz à la fréquence de 1 000 Hz, la tension ne dépassant pas 5 V. On a mis en évidence une grande influence des perturbations, y compris celle de la fréquence industrielle, surtout quand on utilise le schéma de la figure 2.

Comme indicateur d'équilibre on employait des appareils à filtres ayant une bande passante étroite, par exemple un analyseur d'harmoniques.

En 1953 et 1954, trois observateurs ont fait huit séries de mesures (tableau I).

Trois bobines étalons de résistance, du type non hermétique, ont été utilisées; leur valeur nominale est de 100 Ω .

Les bobines à inductance calculée qui ont servi de référence, faisaient partie du groupe de l'étalon russe du henry. La valeur moyenne de la fréquence (générateurs de la fréquence étalon) pour la durée des mesures était de $1\,000,0067 \pm 0,0002$ Hz.

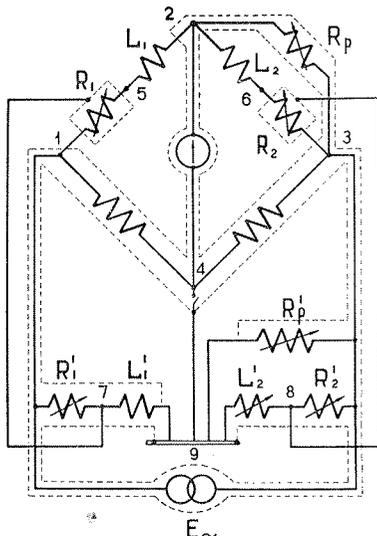


Fig. 3.

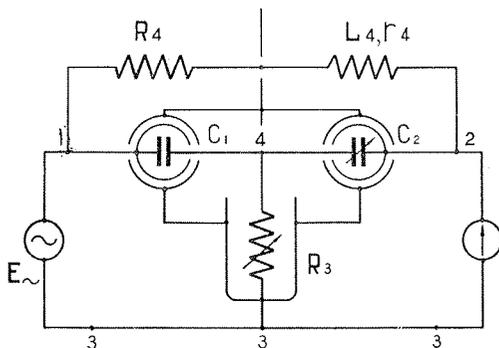


Fig. 4.

Les résultats des mesures de résistance (résultats moyens) et les erreurs probables de ces résultats sont donnés dans le tableau I, colonne 6; dans la colonne 7 sont donnés les résultats des mesures des bobines obtenus lors de leur étalonnage en courant continu, c'est-à-dire pendant la comparaison avec le groupe de bobines de l'étalon primaire de $1\ \Omega$.

TABLEAU I.

Date. (1)	Inductance N°. (2)	Schéma. (3)	N° des bobines mesurées. (4)	Nombre de mesures. (5)	Résistance des bobines à 20°C (en Ω).		(6)-(7). (8)
					Mesures absolues. (6)	Mesures relatives. (7)	
1953	ПБ-1 КБ-1 ПБ-3	X, T	90	68	100,055 \pm 0,0019	100,0536 \pm 0,0001	+ 1,1 · 10 ⁻⁵
1953	ПБ-1	X	90	16	100,053 \pm 0,0009	100,0536 \pm 0,0001	- 0,6
1953	ПБ-1	T	90	17	100,053 \pm 0,0026	100,0535 \pm 0,0001	- 0,5
1953	ПБ-3	T	90	19	100,052 \pm 0,0027	100,0531 \pm 0,0001	- 1,1
1954	ПБ-1	X	90	10	100,0525 \pm 0,0009	100,0531 \pm 0,0001	- 0,6
1954	ПБ-1	X	39	7	100,229 \pm 0,0008	100,2321 \pm 0,0001	- 3,1
1954	ПБ-3	T	39	8	100,231 \pm 0,0004	100,2321 \pm 0,0001	- 1,1
1954	ПБ-1	X	323	12	100,058 \pm 0,0005	100,0605 \pm 0,0001	- 2,5

La différence moyenne pondérée entre les résultats des mesures absolues et relatives est de $1,6 \cdot 10^{-5}$ de la valeur mesurée.

Si l'on fait abstraction de l'erreur d'étalonnage des bobines de résistance en courant continu, c'est-à-dire lors du passage de 1Ω à 100Ω , la valeur de la résistance des bobines de l'étalon primaire de 1Ω déterminée par les étalons d'inductance et de fréquence est plus faible de $15,5 \mu\Omega$.

Les termes correctifs pour les formules de calcul dépendent de plusieurs facteurs, dont les principaux sont : les paramètres résiduels des éléments des schémas, les angles de perte des condensateurs, la variation des résistances à cause de l'effet de peau et de la température.

En examinant l'ordre de grandeur des erreurs des résultats de mesure, nous pouvons profiter de la loi d'accumulation des erreurs fortuites. Alors

$$(4) \quad \begin{cases} \frac{\Delta R_X}{R_X} \approx \frac{dR_X}{R_X} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_X^0}{R_X^0}\right)_X^2 + (d\varepsilon_X)^2} & (\text{fig. } 3), \\ \frac{\Delta R_X}{R_X} \approx \frac{dR_X}{R_X} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_X^0}{R_X^0}\right)_T^2 + (d\varepsilon_T)^2} & (\text{fig. } 4). \end{cases}$$

Sur la base des résultats moyens obtenus par l'expérience, nous avons

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial R_X^0}{R_X^0}\right)_X &\approx \left(\frac{\Delta L_1}{L_1}\right)^2 + 1 \cdot 10^{-10}, & \left(\frac{\partial R_X^0}{R_X^0}\right)_T &\approx \left(\frac{\Delta L_1}{L_1}\right)^2, \\ (d\varepsilon_X)^2 &\approx 1 \cdot 10^{-13}, & (d\varepsilon_T)^2 &\approx 4 \cdot 10^{-10}. \end{aligned}$$

Les erreurs maxima obtenues par l'expérience et par le calcul (4) sont alors les suivantes :

par l'expérience (tableau I)

$$\sqrt{(1,2)^2 + (3,1)^2} \cdot 10^{-5} \approx 3 \cdot 10^{-5},$$

par le calcul (4)

$$\sqrt{(1+1)^2 + 4} \cdot 10^{-5} \approx 3 \cdot 10^{-5}.$$

Tout récemment, on a pu élaborer une nouvelle méthode de mesure de la résistance en réalisant l'équilibre préalable du circuit de la figure 2. Cette méthode donne la possibilité d'éliminer l'influence des angles de perte des condensateurs C_1 et C_2 et de l'effet de peau de la résistance. Les recherches expérimentales sur cette nouvelle méthode se poursuivent actuellement.

RÉALISATION DE L'UNITÉ DE RÉSISTANCE
PAR L'INDUCTANCE MUTUELLE CALCULÉE ET LA FRÉQUENCE.

La méthode utilise le schéma connu de Wenner, qui donne la possibilité de compenser la chute de tension dans la résistance mesurée par la valeur moyenne de la force électromotrice apparaissant dans l'enroulement secondaire de la bobine primaire alimentée en courant alternatif à fréquence constante [4].

Pour appliquer cette méthode on a construit un appareil composé de deux parties principales : la bobine d'inductance mutuelle et le dispositif de communication.

L'enroulement primaire de la bobine est constitué de trois sections sur un cylindre en quartz; l'enroulement secondaire se présente sous la forme d'une bobine à plusieurs couches sur une carcasse en verre.

Les caractéristiques des bobines pour le calcul de l'inductance mutuelle sont les suivantes :

Rayon moyen du solénoïde.....	14,842 6 ₅ cm
Longueur des sections extrêmes.....	18,013 2 ₈ cm
Nombre de spires dans chacune des sections extrêmes...	180
Nombre de spires de la section centrale.....	30
Longueur de la section centrale.....	3,003 0 ₀ cm
Rayon moyen de la bobine secondaire à plusieurs couches.	22,927 9 ₆ cm
Dimensions de la section de l'enroulement.....	(1×0,6) cm ²
Nombre de spires de la bobine secondaire.....	315

La valeur de l'inductance mutuelle, compte tenu de la correction pour l'extrémité de la section de l'enroulement secondaire, est 0,012 508 14 ± 1. 10⁻⁸ H.

Le dispositif de communication est composé d'un moteur synchrone, d'un convertisseur du courant continu en courant alternatif de la puissance exigée, d'un générateur à excitation constante et des commutateurs.

La constance de la fréquence est assurée avec une précision de 2. 10⁻⁸ en alimentant le moteur synchrone par les générateurs des étalons à quartz.

Sur la base des mesures préliminaires de la bobine étalon de 1 Ω effectuées en 1956, on a obtenu

$$R = 1,000 517 \pm 0,000 010 \Omega.$$

La différence entre cette valeur et la valeur obtenue par comparaison avec le groupe de l'étalon primaire de l'ohm est de — 0,000 012 Ω, soit 1,2. 10⁻⁵ en valeur relative; cette différence est dans les limites des erreurs de mesure.

En conclusion, les résultats de la réalisation de l'unité de résistance électrique par les deux méthodes décrites ci-dessus se trouvent dans les limites de $3,5 \mu\Omega$.

(Mai 1957.)

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] KROTKOV (I.), *Elektrichestvo*, n° 10, 1952.
- [2] TUTTLE (W.), *Proceedings of the I. R. E.*, jan. 1940, p. 23.
- [3] KROTKOV (I.), GOUSTCHINA (T.), CHLIKEVITCH (A.), Réalisation de l'unité de résistance électrique d'après les étalons des unités d'inductance et de fréquence, *Mémoires et travaux scientifiques des Instituts du Comité des Normes, des Mesures et Instruments de Mesure auprès du Conseil des Ministres de l'U. R. S. S.*, Recueil n° 1, 1956, p. 60.
- [4] WENNER (F.), *Science*, 29, 1909, p. 475.

ANNEXE E 9.

Institut de Métrologie D. I. Mendéléev (U. R. S. S.).

ÉTALON PRIMAIRE DE L'UNITÉ D'INDUCTANCE DE L'U. R. S. S. (*)

Par I. KROTKOV.

(Traduction remise.)

Depuis 1952, l'étalon primaire du henry est représenté en U. R. S. S. par un groupe de quatre bobines d'inductance d'une valeur nominale de 0,01 à 0,04 H [1]. Les enroulements à une seule couche sont bobinés sur un support en pyrex et en quartz.

Le fil est placé dans les rainures taillées d'avance sur la surface des supports. Pour mettre les bobines en circuit on utilise des conducteurs fixes (entrées) assujettis aux extrémités des enroulements (*fig. 1*).

Les dimensions géométriques principales des bobines sont mesurées à l'aide de comparateurs spéciaux par comparaison avec les étalons à bouts Nos 254, 9 080, 15 553 de l'Institut de Métrologie; les mesures ont été faites sur quatre génératrices du cylindre, et sur 30 points au moins. La valeur moyenne de ces dimensions est donnée dans le tableau I.

Les erreurs probables de la détermination du diamètre et de la hauteur des bobines ne dépassent pas $\pm 0,3 \mu$.

La valeur de l'inductance de chaque bobine est déterminée par le calcul d'après la formule de Lorenz, pour chaque couche du courant couvrant la surface du cylindre droit, avec application de la correction de Snow pour la section et l'hélice de l'enroulement du fil [2].

La grandeur de l'unité du henry est déterminée par la moyenne arithmétique des valeurs de l'inductance de quelques bobines, avec une erreur qui ne dépasse pas $1 \cdot 10^{-5}$ en valeur relative.

(*) *Trud. Inst. Metrologii*, 1957, n° 31 (81), p. 19.

On a l'intention de répéter périodiquement ces mesures à des intervalles d'au moins dix ans.

Dans les intervalles des mesures géométriques, la moyenne arithmétique des valeurs de l'inductance de chaque bobine est considérée comme constante, c'est-à-dire

$$(1) \quad \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}{4} = L_m = \text{const.}$$

Pour connaître le degré de stabilité de chaque bobine entre les mesures de ses dimensions géométriques, on utilise la méthode

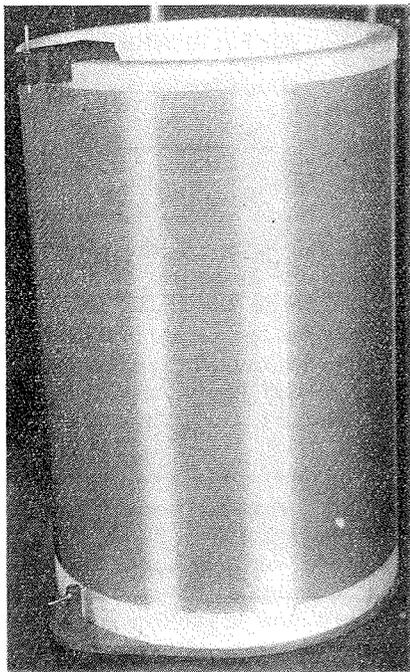


Fig. 1.

de contrôle indirect. Cette méthode d'observation est basée sur l'emploi de la relation (1), ainsi que sur les différences entre les valeurs des inductances des bobines, déduites de mesures relatives et traitées par la méthode des moindres carrés.

En comparant les valeurs des inductances obtenues par cette méthode avec les résultats du calcul pour chacune des bobines (dans les limites des mesures relatives), on peut juger de leur stabilité dans le temps.

TABLEAU I.

N° de la bobine.	Date de la mesure.	Résultats moyens des mesures des dimensions géométriques des bobines (en mm).			Nombre de spires.	Inductance calculée des bobines (H).
		Diamètre.	Pas de l'hélice.	Hauteur.		
ПБ-1.....	1951	264,456	0,899 55	366,117	407	0,023 526 3
	1952	264,456	0,899 57	366,120	407	0,023 526 4
ПБ-2.....	1952	259,981	0,899 88	399,548	444	0,025 478 5
ПБ-3.....	1951	269,472	0,900 04	439,217	488	0,030 451 9
КБ-1.....	1952	280,092	1,125 19	371,311	330	0,016 940 0
	1953	280,091	1,125 20	371,313	330	0,016 939 9

Les mesures en courant alternatif à la fréquence de 1 000 Hz ont montré que le degré d'instabilité des bobines ne dépassait pas 10^{-5} , c'est-à-dire qu'il se trouve dans les limites des erreurs de mesure.

(Mai 1957.)

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] КРОТКОВ (I.), ГОУСТЧИНА (Т.), ЧИЛИКЕВИЧ (А.), Étude de l'étalon primaire de l'unité d'inductance, *Notes et travaux de recherches scientifiques des Instituts du Comité des Normes, des Mesures et Instruments de Mesure auprès du Conseil des Ministres de l'U. R. S. S.*, Recueil n° 1, 1956, p. 59.
- [2] SNOW (C.), *Scientific Papers of the Bureau of Standards*, 21 (n° 537), 1926-1927, p. 431.

ANNEXE E 10.

Institut de Métrologie D. I. Mendéléev (U. R. S. S.).

ÉTALON PRIMAIRE DE L'UNITÉ DE CAPACITÉ DE L'U. R. S. S. (*)

Par I. KROTKOV.

(Traduction remise.)

Dans les années 1948-1950 on a établi un groupe de quatre condensateurs au mica, dont la capacité a une valeur nominale de 10^5 pF. Ces condensateurs ont constitué l'étalon primaire de l'unité de capacité [1]. La valeur nominale des capacités a été choisie en partant de la meilleure concordance des éléments du schéma de mesure employé (schéma en pont).

La valeur réelle de la capacité de chaque condensateur est déterminée en courant alternatif, à la fréquence de 1 000 Hz, par la méthode de mesure suivante :

1. La capacité des quatre condensateurs connectés en parallèle

$$(1) \quad C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = C_m$$

est mesurée par l'inductance de l'étalon primaire et par les résistances du pont avec une erreur de 1 à $2 \cdot 10^{-5}$ [1], [2].

Les résistances du pont, de l'ordre de 100 Ω , sont comparées à leur tour en courant continu avec l'étalon de l'ohm. L'expérience et les calculs ont montré que, pour le système correspondant aux résistances en forme de rubans, la correction pour l'effet de peau à la fréquence de 1 000 Hz est si petite qu'on peut la négliger.

2. Les condensateurs composant l'étalon primaire (C_1, C_2, C_3, C_4)

(*) Résumé de l'article en langue russe publié dans *Trud. Inst. Metrologii*, 1957, n° 31 (91), p. 36-43.

sont comparés mutuellement dans différentes combinaisons :

$$(2) \quad \begin{cases} C_1 - C_2 = \Delta C_{12}, & C_1 - C_3 = \Delta C_{13}, & C_1 - C_4 = \Delta C_{14}, \\ C_2 - C_3 = \Delta C_{23}, & C_2 - C_4 = \Delta C_{24}, & C_3 - C_4 = \Delta C_{34}. \end{cases}$$

Ces comparaisons sont effectuées au moyen d'un pont en courant alternatif pour la fréquence de 1 000 Hz avec une erreur ne dépassant pas $3 \cdot 10^{-6}$ [2].

3. Le système des équations (1) et (2) est traité d'une manière générale afin d'obtenir pour les capacités C_1 , C_2 , C_3 et C_4 des valeurs telles que la somme des carrés des erreurs résiduelles soit minimum.

$$(3) \quad \begin{cases} C_1 = \frac{C_m}{4} + \frac{1}{4} (\Delta C_{12} + \Delta C_{13} + \Delta C_{14}), \\ C_2 = \frac{C_m}{4} + \frac{1}{4} (-\Delta C_{12} + \Delta C_{23} + \Delta C_{24}), \\ C_3 = \frac{C_m}{4} - \frac{1}{4} (\Delta C_{13} + \Delta C_{23} - \Delta C_{34}), \\ C_4 = \frac{C_m}{4} - \frac{1}{4} (\Delta C_{14} + \Delta C_{24} + \Delta C_{34}). \end{cases}$$

Les mesures (1) et (2) s'effectuent chaque année.

Entre deux déterminations de l'unité de capacité, la somme de la capacité des quatre condensateurs est considérée comme invariable.

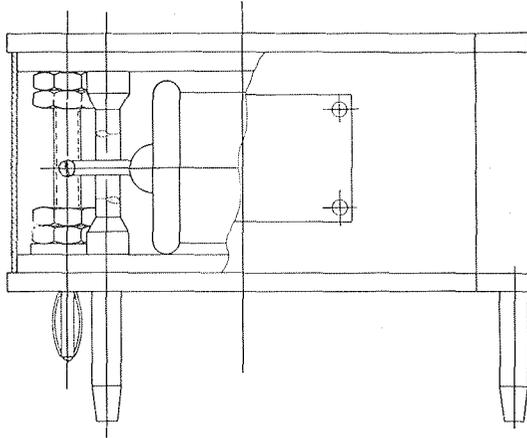


Fig. 1.

Les condensateurs (*fig. 1*) représentent un système d'électrodes hermétiques et échancrées, séparées par un diélectrique de mica.

Les électrodes sont obtenues par évaporation sous vide d'argent sur les surfaces des lames de mica. La construction de ces condensateurs, réalisée à l'Institut de Métrologie, permet de les connecter directement à l'aide de contacts élastiques aux unités du type le plus répandu (par exemple aux condensateurs à air, du type Guibet et Zickner). Dans ce but, la distance entre les axes des contacts élastiques est considérée comme constante et égale à 20 mm. L'emploi de ces condensateurs a permis, dans un domaine assez large de valeurs nominales et dans des limites d'erreur de l'ordre de 10^{-5} et pour une fréquence de 1 000 Hz, de profiter de la sommation arithmétique des capacités connectées en série.

Il apparaît que ces condensateurs pourraient être commodes lors de comparaisons mutuelles dans différents laboratoires nationaux. On s'affranchit ainsi, en particulier, de l'incertitude due aux effets de bout qui se manifestent lors de la connection par fils souples.

(Mai 1957.)

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] КРОТКОВ (I.), ГОУСТЧИНА (Т.), ЧЕЛИКЕВИЧ (А.), Détermination des valeurs des étalons d'inductance et de capacité en unités absolues, *Mémoires et travaux scientifiques des Instituts du Comité des Normes, des Mesures et Instruments de Mesure auprès du Conseil des Ministres de l'U. R. S. S.*, Recueil n° 1, 1956, p. 63.
- [2] КРОТКОВ (I.), *Electrichestvo*, n° 10, 1956.



ANNEXE E 44.

Institut de Métrologie D. I. Mendéléév (U. R. S. S.).

COMPARATEUR
POUR ÉLÉMENTS NORMAUX ÉTALONS (*)

Par Z. ZÉLIKOVSKI.

(Traduction remise.)

L'Institut de Métrologie a élaboré un nouveau comparateur pour les éléments normaux étalons, en prenant en considération l'expérience de la construction des comparateurs dans les laboratoires de l'U. R. S. S. et de l'étranger [1]-[5].

Le comparateur est basé sur la méthode de substitution qui consiste à mesurer alternativement, à l'aide d'un compensateur, la différence entre la force électromotrice d'un élément de référence E_n et celle d'un élément normal auxiliaire (*tare*) E_t , puis la différence entre la force électromotrice de l'étalon E_x et celle de l'élément tare E_t . La différence des lectures au compensateur entre la première et la deuxième mesure donne la force électromotrice cherchée ($E_x - E_n$).

L'analyse comparative des méthodes de comparaison des éléments normaux montre que cette méthode est plus avantageuse que la méthode connue d'opposition directe, notamment : *a.* l'élément de référence est moins employé au cours des mesures; *b.* la sensibilité du montage peut être presque doublée par suite de la réduction de la résistance de l'élément tare; *c.* le nombre des contacts à balais frottants est diminué et l'élimination des forces thermoélectriques constantes est effectuée à l'aide d'un inverseur.

Le défaut de la méthode de substitution réside dans l'emploi d'un élément tare dont l'instabilité de la force électromotrice

(*) Résumé de l'article en langue russe publié dans *Trud. Inst. Metrologii*, 1957, n° 31 (81), p. 44-52.

pendant le cycle fermé des substitutions augmente l'erreur des mesures. Cependant si l'élément est spécialement construit et conservé avec soin, on peut négliger cette instabilité.

Le comparateur, dont le schéma est donné à la figure 1, fonctionne d'après le principe de l'équilibre absolu, ce qui évite la nécessité de recourir à l'interpolation d'un état d'équilibre et à la détermination de la sensibilité du circuit qui change d'un élément à l'autre et qui diminue aussi la polarisation de l'élément normal. La capacité de mesure du comparateur est de $3\ 000\ \mu\text{V}$. L'erreur de l'appareil ne dépasse pas $0,02\ \mu\text{V}$ pour une différence de potentiel mesurée inférieure à $200\ \mu\text{V}$.

Le comparateur fournit directement la valeur cherchée E_c sans calcul supplémentaire.

Pour diminuer les forces électromotrices de contact possibles, le nombre des contacts à balais frottants dans le circuit de mesure a été réduit à un seul (clef K en cuivre sous la forme d'un commutateur à balais à trois positions). La résistance du circuit de mesure du comparateur est d'environ $1\ 000\ \Omega$.

La partie principale du comparateur se compose de deux compensateurs à courant continu, dont l'un est gradué, et qui sont connectés en série. Le compensateur gradué est construit d'après un schéma en pont modifié (pour éliminer les contacts de frottement du circuit de mesure) et comporte cinq décades. Le courant d'alimentation du compensateur est réglé à l'aide d'un appareil supplémentaire composé de la résistance de réglage R_r (bobine et décade), du galvanomètre à aiguille G_2 et d'une boîte de résistance. Le compensateur non gradué se présente sous la forme d'un diviseur de potentiel à résistances shuntées (pour éliminer les contacts à balais frottants du circuit de mesure); il possède deux étages de réglage.

La lecture directe au comparateur de la valeur cherchée E_c s'obtient de la manière suivante : les balais du compensateur gradué étant à la position zéro, les limbes des décades peuvent être déplacés indépendamment des balais; pour cela il faut tourner la manette jusqu'à son butoir et éliminer l'accouplement du limbe avec le balai. On peut alors inscrire sur le compensateur n'importe quel chiffre de $1,017\ 000\ 0$ à $1,019\ 999\ 9$, par échelons de $0,1\ \mu\text{V}$; dans ce cas la tension de compensation est nulle. La première opération qu'on fait pour la mesure consiste à inscrire sur le compensateur une valeur numériquement égale à la force électromotrice de l'élément normal E_n . On connecte ensuite l'élément normal E_n au comparateur (*fig. 1*), on met en circuit la clé K et, par le réglage des shunts du compensateur non gradué, on réalise l'équilibre que l'on constate par l'absence de déviation du galvanomètre G_1 . On compense ainsi la différence de la force électromotrice ($E_n - E_c$), les forces thermoélectriques, le courant

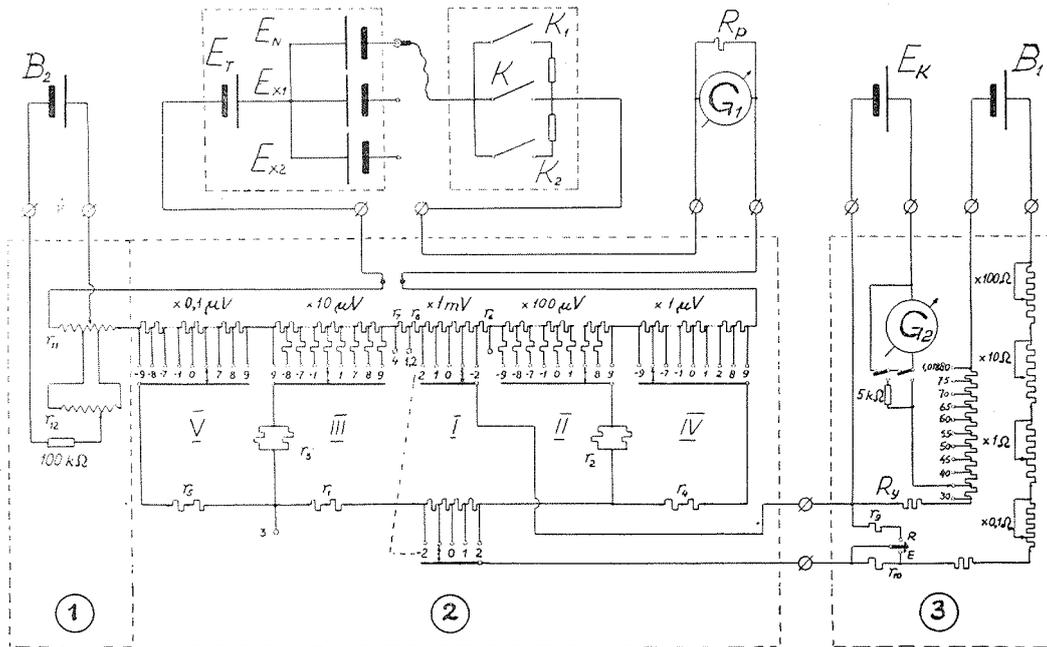


Fig. 1. — Schéma du comparateur pour éléments normaux étalons.
 1, compensateur non gradué; 2, compensateur gradué; 3, installation complémentaire.

de fuite dans le circuit de mesure et en même temps la tension du zéro du compensateur gradué. On substitue ensuite l'élément normal E_n à E_x et l'on réalise l'équilibre à l'aide des manettes du compensateur gradué. La tension de compensation du compensateur gradué est égale à $(E_x - E_n)$ et elle peut être positive ou négative, l'indication du compensateur étant égale à E_x .

Ainsi la valeur de $E_x = E_n + (E_x - E_n) - (E_n - E_n)$ est obtenue automatiquement, sans calcul de la part de l'observateur.

Les compensateurs gradué et non gradué sont placés dans une boîte, l'appareil supplémentaire dans une autre.

Comme élément tare E_l on a employé des éléments normaux spécialement construits avec des électrodes de surface plus grande (le diamètre des branches est de 35 mm); cette construction a permis d'abaisser la résistance de l'élément jusqu'à 50 Ω et d'augmenter en outre sa stabilité sous l'action des courants de mesure. L'élément normal E_l est placé dans un bain d'huile installé dans un local thermostatique.

Le galvanomètre G_1 a une sensibilité de $0,5 \cdot 10^{-9}$ A/mm, une résistance critique extérieure de 1 200 Ω et une période d'oscillation de 7 s. Pour un élément normal d'une résistance inférieure à 1 000 Ω mis en circuit, la force électromotrice peut être mesurée à 0,05 μ V près.

A l'aide de ce comparateur on a effectué les comparaisons mutuelles des éléments normaux représentant l'étalon primaire du groupe du volt.

La précision des mesures et la stabilité de la force électromotrice des éléments normaux pendant les quelques jours nécessaires pour les mesures sont appréciées par l'erreur

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n(k-1)}},$$

où v_i = erreur d'une seule mesure;

n = nombre des éléments normaux à comparer (dans notre cas $n = 20$);

k = nombre des mesures de chaque élément, égal au nombre de jours des mesures (tous les éléments ont été mesurés une seule fois chaque jour).

L'erreur probable du résultat est

$$R = \frac{0,67}{\sqrt{k}} \sigma.$$

Les comparaisons mutuelles ont été effectuées en avril 1956 (100 mesures pendant 5 jours; $\sigma = 0,08 \mu$ V, $R = 0,02 \mu$ V) et

en décembre 1956 (160 mesures pendant 8 jours; $\tau = 0,1 \mu\text{V}$; $R = 0,02 \mu\text{V}$). La plus grande variation de la force électromotrice d'un élément normal pendant ce temps est égale à $0,5 \mu\text{V}$.

Ainsi, la précision des comparaisons mutuelles de la force électromotrice des éléments normaux est presque dix fois plus élevée que celle des comparaisons antérieures [1], [2].

(Mai 1957.)

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] ТЧОУРАЕВА (E. S.), La méthode et les instruments servant à la comparaison des éléments normaux, *Mémoires de la Chambre Centrale des Poids et Mesures de l'U. R. S. S., présentés au Comité Consultatif d'Électricité et de Photométrie*, n° 100, Leningrad 1932, p. 17-28 (95-104).
- [2] БУКОВ (M. A.), Méthode potentiométrique différentielle pour la comparaison des éléments normaux, *Travaux de l'Institut des Mesures et Instruments de Mesure de Moscou*, 1950, p. 56-59.
- [3] BROOKS (H. B.), The standard cell comparator, a specialized potentiometer, *J. Research N. B. S.*, 11, 1933, p. 211-231.
- [4] STEINWEHR (H.), Ausarbeitung und Herstellung von fünf Mustern von Potentiometer-Komparatoren zur Bestimmung der EMK von Normal-elementen mit höchster Genauigkeit, Aufgabe n° 10/48, P. T. B. 1948.
- [5] ROMANOWSKI (M.), Coordination des unités électriques au Bureau International des Poids et Mesures, *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures*, vol. XXI, 1952.

ANNEXE E 12.

Electrotechnical Laboratory (Japan).

ÉTAT ACTUEL
DE LA DÉTERMINATION ABSOLUE DE L'OHM
A L'ELECTROTECHNICAL LABORATORY (*)

Une détermination absolue de l'ohm, basée sur les étalons d'inductance mutuelle, a été effectuée en 1937 à l'Electrotechnical Laboratory. Après un examen sérieux du problème, les recherches ont été reprises en 1952 avec la construction de nouveaux étalons de self-inductance.

Les noyaux des étalons d'inductance ont été coulés à l'Institut Gouvernemental de Recherches des Industries Chimiques, Osaka; ils sont en verre borosilicaté et ont environ 300 mm de diamètre et 370 mm de longueur. Le coefficient de dilatation linéaire du verre est $2,5 \cdot 10^{-6}$ par degré C.

Les noyaux subissent tout d'abord une rectification préliminaire et un recuit; ils sont ensuite filetés au pas de 1 mm à l'aide de la molette en diamant d'une machine à fileter de précision. Un rodage des filets permet finalement de réduire à quelques microns les irrégularités du pas et du diamètre effectif des noyaux.

Actuellement, trois étalons d'inductance, Nos 12, 15 et 21, sont terminés et des efforts sont faits pour fabriquer un plus grand nombre de noyaux de haute précision.

Le fil des inductances a un diamètre de 0,7 mm; il est en cuivre pur exempt d'oxygène. Le fil est enroulé de telle sorte que les irrégularités de son diamètre et les défauts de circularité de l'enroulement soient compris entre $\pm 0,1 \mu$.

Le diamètre du fil est comparé à celui d'un fil calibré, la diffé-

(*) Résumé des quatre documents en langue anglaise distribués aux Membres du Comité Consultatif d'Électricité. Ces travaux ont fait par ailleurs l'objet d'études publiées en langue japonaise dans *Bull. Electrotechnical Laboratory*, 17, 1953, p. 434, 641, 652; 18, 1954, p. 403; 19, 1955, p. 736, 934; 20, 1956, p. 427.

rence étant mesurée à l'aide d'un microscope interférentiel. Ces mesures sont reproduites avec une exactitude de $\pm 0,02 \mu$.

Le diamètre de l'étalon d'inductance est mesuré par comparaison à un étalon à bouts en utilisant deux microscopes interférentiels.

Le principe de la mesure du pas de l'enroulement est le même que celui qui est utilisé dans la détermination des calibres à bouts, de sorte que la longueur d'onde de la lumière sert d'étalon.

Pour calculer l'inductance correspondant aux dimensions géométriques moyennes de l'étalon nous employons la formule de Snow, que nous avons été amenés à compléter après l'étude des points suivants :

1° Correction de l'inductance d'une hélice étalon pour tenir compte des irrégularités de l'enroulement;

2° Correction de l'inductance due à la perméabilité du noyau;

3° Distribution du courant électrique stationnaire dans un conducteur hélicoïdal de longueur infinie.

L'inductance de chaque étalon est d'environ 18 mH. Nous nous proposons de faire les mesures en utilisant deux ou trois étalons d'inductance connectés en série et placés perpendiculairement l'un à l'autre.

Les mesures électriques sont faites au moyen d'un pont de Maxwell-Wien à courant alternatif et d'un pont à commutateur de Maxwell en utilisant des condensateurs de 0,1, 0,15 et 0,2 μ F comme intermédiaires.

Les fréquences de la source qui alimente le pont de Maxwell-Wien à courant alternatif sont 18, 90 et 450 Hz.

Le commutateur du pont à commutateur de Maxwell est un relais polarisé fonctionnant aux fréquences de 500, 250 et 125 Hz obtenues à partir de l'étalon de fréquence du Japon (JJY).

L'ensemble des appareils de mesure et la machine à fileter (sont placés dans une pièce à température constante ($20 \pm 0,1^\circ$ C.

ANNEXE I. — *Correction à l'inductance d'une hélice étalon, pour tenir compte des irrégularités de l'enroulement.*

Description d'une méthode mathématique permettant d'obtenir théoriquement une formule générale pour le calcul de la correction ΔL à apporter à l'inductance en courant continu d'une hélice à une seule couche, pour tenir compte des erreurs de position des spires. On admet que le passage du courant dans l'hélice s'effectue suivant une nappe cylindrique continue dont la composante axiale est négligeable. La formule est obtenue à partir des équations fondamentales liant le champ magnétique aux caractéristiques géométriques du circuit; les calculs sont effectués

au moyen de transformations mathématiques et de simplifications appropriées. On montre que $\Delta L \equiv \Delta_1 L + \Delta_2 L$, où $\Delta_1 L$ représente la correction d'inductance due à la composante radiale des irrégularités de position des spires et $\Delta_2 L$ est la correction due à la composante axiale de ces irrégularités. Le résultat final est donné sous une forme se prêtant bien aux calculs numériques.

ANNEXE II. — *Correction à l'étalon d'inductance, pour tenir compte de la perméabilité de son noyau.*

Pour résoudre ce problème, le National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique) a calculé en 1936 la valeur de la correction par deux méthodes, désignées sous les noms de « méthode d'intégration » et de « méthode de réductance ».

L'auteur reprend l'étude de cette question, avec une estimation de l'ordre de grandeur des approximations de sa méthode. La comparaison des trois méthodes sur un exemple numérique montre que les méthodes du N. B. S. fournissent une valeur de la correction qui est trop petite de $1 \cdot 10^{-6}$.

ANNEXE III. — *Sur la distribution d'un courant électrique stationnaire dans un conducteur hélicoïdal de longueur infinie (*)*.

La formule donnant la distribution d'un courant électrique stationnaire dans un conducteur hélicoïdal de longueur infinie est calculée théoriquement. On admet que la section du fil constituant l'hélice est circulaire, de dimension uniforme, et que la densité de courant et la conductibilité électrique sont symétriques autour de l'axe du noyau cylindrique sur lequel est enroulée l'hélice. La formule est obtenue à partir des équations fondamentales de Maxwell relatives au champ électromagnétique, et exprimées dans un système de coordonnées hélicoïdales. On a effectué un calcul approché correct jusqu'au troisième ordre inclus en $\frac{p}{\varphi_0}$ et $\frac{r_0}{\varphi_0}$, où $2\pi p$ est le pas de l'hélice, r_0 le rayon de la section circulaire du fil et φ_0 le rayon du noyau cylindrique. On montre que le courant résultant parcourt les spires de l'hélice en suivant dans l'ensemble ce que Snow a appelé la « distribution naturelle », et en tournant légèrement dans un sens opposé à celui de l'hélice.

(Mars 1957.)

(*) Étude publiée en langue anglaise dans *Bull. Electrotechnical Laboratory*, 21, 1957, p. 755.

ANNEXE E 13.

Deutsches Amt für Mass und Gewicht (Allemagne).

TRAVAUX
AU CALORIMÈTRE DIFFÉRENTIEL
POUR DÉTERMINER L'AMPÈRE ABSOLU

Par D. BENDER.

(Traduction.)

H. v. Steinwehr a proposé, en 1946, une nouvelle méthode pour déterminer les valeurs de l'ampère et du volt ⁽¹⁾, méthode fondée sur la comparaison des énergies mécanique et électrique après leur transformation en chaleur dans un calorimètre différentiel. Les unités d'intensité de courant et de différence de potentiel qui en résultent, sont exprimées par les relations suivantes :

$$1 \text{ ampère} = \sqrt{\frac{1 \text{ joule mécanique}}{1 \text{ ohm} \cdot 1 \text{ seconde}}},$$
$$1 \text{ volt} = \sqrt{\frac{1 \text{ joule mécanique} \cdot 1 \text{ ohm}}{1 \text{ seconde}}}.$$

Quand la résistance électrique est mesurée en ohm absolu, on tire de ces relations l'ampère et le volt absolus. Les erreurs de mesure dans la détermination de la puissance (en J/s) et de la résistance électrique (en Ω) n'apparaissent que pour moitié dans le résultat de la mesure des grandeurs électriques, volt et ampère.

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL. — Pour effectuer ces expériences, on a construit au D. A. M. G. un dispositif dont la partie essentielle est un calorimètre différentiel formé par deux demi-cylindres en cuivre thermiquement isolés et disposés de manière que les deux

⁽¹⁾ *Z. f. Physik*, 124, 1948, p. 322.

côtés plans rectangulaires se trouvent l'un en face de l'autre à peu de distance (1 et 2 sur la figure 1). Ces deux demi-cylindres, d'une longueur de 340 mm et d'un diamètre de 100 mm, possèdent chacun deux canaux longitudinaux d'un diamètre de 25 mm. Dans l'un de ces canaux est placé un système chauffant électrique (3) pour transformer l'énergie électrique, dans l'autre se trouve un corps de chute (4) pour transformer l'énergie mécanique en chaleur.

Les systèmes chauffants sont constitués par un tube en laiton avec un bobinage en fil de manganine. Pour obtenir une bonne transmission de chaleur, l'espace intermédiaire entre l'enroulement de chauffe et la paroi de cuivre est garni de paraffine. On évite une perte de chaleur à travers les conducteurs d'amenée de courant par une disposition et des dimensions convenables de ces conducteurs. Les corps de chute sont des cylindres en laiton remplis de plomb, d'un poids d'environ 0,7 kg, et dont la longueur (150 mm) est la même que celle du parcours qu'ils font pendant leur chute; on obtient l'énergie de chute la plus grande en choisissant cette proportion des longueurs. Leur diamètre a été choisi de telle sorte qu'ils glissent facilement au moyen de bagues de guidage, montées aux extrémités, pourvu qu'elles soient bien graissées. Les cylindres de chute possèdent un canal longitudinal muni d'un robinet (5) pour le réglage de l'échappement d'air, et par conséquent de la vitesse de chute.

Des plaques en aluminium (6) sont vissées sur les deux faces de base des demi-cylindres en cuivre. Ce sont ces plaques qui, au moyen de joints à bague de caoutchouc, ferment hermétiquement les espaces qui sont parcourus pendant la chute. Le parcours de chute, limité des deux côtés par deux vis (7), est déterminé par la distance entre les têtes de vis (distance qui peut être mesurée par un micromètre spécial) et par la longueur des vis, ainsi que par la longueur du cylindre de chute. Les pertes de chaleur entre l'espace de chute et l'extérieur sont empêchées par des pièces intermédiaires isolantes.

Pour amener au calorimètre une puissance aussi grande que possible, il faut essayer d'obtenir un temps de chute très court; il faut essayer, d'autre part, d'éviter un choc important en fin de course du corps de chute. Pour cette raison, le canal d'air qui se trouve dans le cylindre de chute est rétréci par des goupilles coniques (8), ce qui réduit la vitesse de chute aux extrémités.

Pour mesurer la différence de température entre les deux demi-calorimètres on se sert d'une pile thermoélectrique comprenant 47 couples mis en série, en combinaison avec un galvanomètre sensible. La pile thermoélectrique (9) entoure le corps de cylindre dans une rainure hélicoïdale, de sorte que les pôles positifs se trouvent sur l'un des deux demi-cylindres, et les pôles

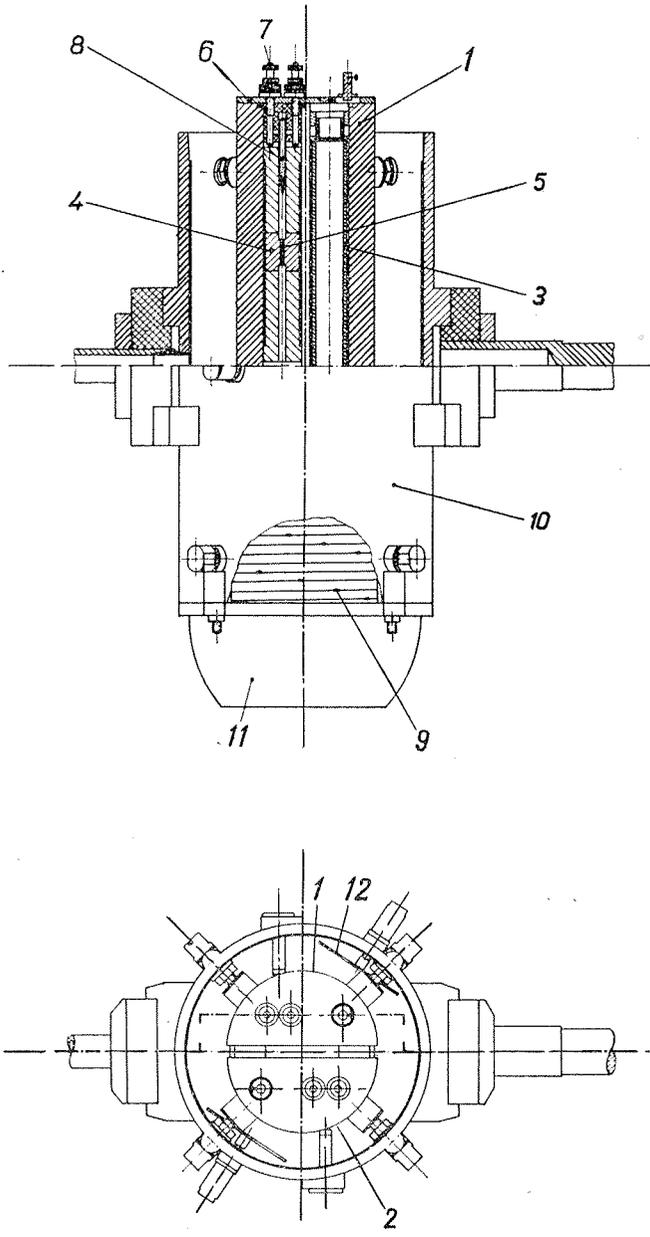


Fig. 1. — Schéma du calorimètre différentiel.

négatifs sur l'autre; ces soudures sont réparties d'une façon aussi régulière que possible. Les couples thermoélectriques sont constitués par des fils de métaux purs, nickel et fer, avec une force thermoélectrique de $35 \mu\text{V}/\text{degré}$; on a évité les alliages qui donnent lieu à des forces thermoélectriques gênantes par suite de leur inhomogénéité. L'épaisseur du fil ne pouvait pas être inférieure à $0,4 \text{ mm}$, à cause de la résistance ohmique de la pile thermoélectrique.

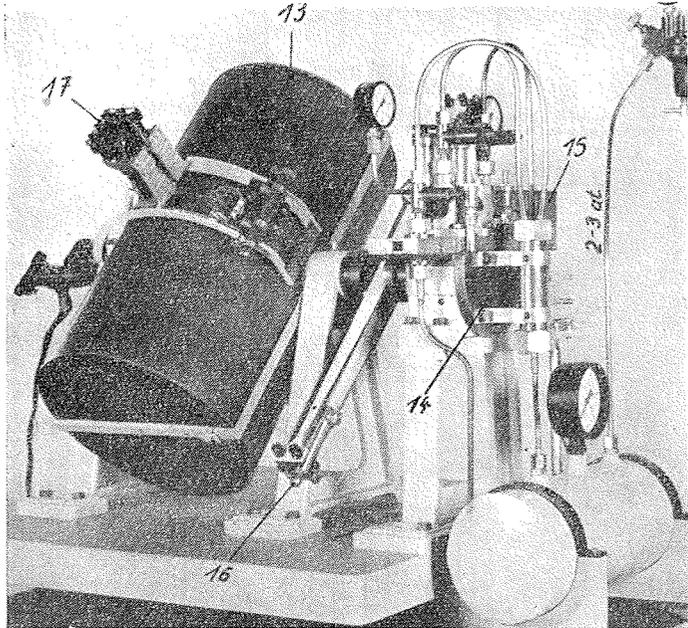


Fig. 2. — Vue d'ensemble du calorimètre différentiel et de son mécanisme de commande.

Le calorimètre proprement dit, thermiquement isolé, a été monté à l'intérieur d'une enveloppe cylindrique (10) munie d'un capot rodé en fonte d'aluminium (11) assurant un ajustage parfait. Pour compenser par conductibilité thermique les petites différences dans la transmission de chaleur entre les demi-calorimètres et l'enveloppe, des plaques en aluminium (12) montées sur vis dans l'enveloppe peuvent être approchées de l'un ou de l'autre demi-cylindre. Pour le calorifugeage extérieur de l'enveloppe, on a utilisé des couvercles à double paroi en « Vinidur » (13 sur la figure 2), qui contiennent des feuilles d'aluminium séparées par des espaces d'air.

Des axes creux en acier, isolés thermiquement au « Novotex », servent à faire tourner le calorimètre et aussi d'ouverture pour l'introduction des fils conducteurs. Ces axes sont montés sur l'enveloppe en fonte d'aluminium du calorimètre; ils reposent, par l'intermédiaire de roulements à billes, sur deux paliers situés sur le bâti de l'appareil à côté du mécanisme de commande (*fig. 2*).

Le mécanisme de commande permet de faire pivoter le calorimètre à intervalles réguliers dans un angle de 180° , ce qui replace le corps de chute à sa position de départ. Si la chute se produit à chaque fois dans les mêmes conditions, une puissance mécanique constante est en moyenne apportée au calorimètre (²). Dans ce but, on se sert d'un moteur à air comprimé et à régulation synchrone (14). Un moteur synchrone (15) alimenté par un courant à fréquence normale, actionne un clapet qui laisse entrer alternativement de l'air comprimé de part et d'autre d'un piston à pivot, ouvrant ou fermant ainsi les échappements d'air. Un changement de vitesses à engrenages permet de régler la durée des périodes à 7,5, 10 ou 15 s. Quand le calorimètre (et par conséquent aussi le trajet de chute) se trouve en position verticale, une goupille (16) encliquète dans un trou du bâti. La chute est alors automatiquement déclenchée par l'intermédiaire d'un électroaimant (17) qui libère une petite goupille de blocage conique située en dessous du corps de chute. Peu de temps après la chute, la goupille d'encliquetage montée sur le bâti est soulevée pneumatiquement et le calorimètre est remis dans sa position de départ par le moteur.

RÉSULTATS DES ESSAIS. — Pour mettre à l'épreuve le calorimètre différentiel on a d'abord chauffé électriquement les deux moitiés et, ce faisant, on a mesuré constamment la différence de température entre les moitiés du calorimètre en fonction de la température du calorimètre comparée à celle de l'enveloppe. On a amené à chaque fois une puissance de chauffage de 0,3 W égale à la puissance mécanique pour la période de chute la plus petite. La température du calorimètre augmentait d'environ 0,1 deg en 20 min. Une différence relative de $1 \cdot 10^{-5}$ des puissances produites devrait conduire à une différence de température de $1 \cdot 10^{-6}$ deg. Celle-ci produit dans la pile thermoélectrique une tension de $47 \times 35 \cdot 10^{-12} \text{ V} = 1,65 \cdot 10^{-9} \text{ V}$, qu'on arrive encore à constater avec le galvanomètre employé d'une sensibilité de $1,5 \cdot 10^{-8} \text{ V/mm}$, l'échelle étant à une distance de 3 m. La différence de température entre les deux moitiés du calorimètre ne changeait pas régulièrement, mais montrait (dans le cas de

(²) La comparaison avec des apports irréguliers de quantité d'énergie conduirait à des erreurs considérables.

températures supérieures de plus de 0,2 deg par rapport à celle de l'enveloppe) des variations irrégulières, d'environ 1.10^{-6} deg/min, qui étaient probablement causées par des courants de convection. On a essayé d'éliminer ces courants de convection en faisant le vide dans l'enveloppe, mais de grosses difficultés se sont présentées pour assurer l'étanchéité de l'enveloppe. Il n'a pas été possible d'essayer une autre méthode, en remplissant l'espace intermédiaire entre l'enveloppe et le calorimètre avec une matière poreuse.

Le mécanisme de pivotage original a été perfectionné, entre autres par l'adjonction de soupapes réglables. Malgré tout, on n'est pas arrivé à un fonctionnement tout à fait régulier; il est vrai que pendant les expériences préliminaires le moteur synchrone ne pouvait être alimenté que par le courant de fréquence instable du réseau, puisqu'un amplificateur convenable pour la fréquence normale de 50 Hz faisait défaut.

En pivotant le calorimètre, on faisait apparaître dans la pile thermoélectrique des tensions induites causées par le champ magnétique terrestre. On a réussi à compenser presque complètement ces tensions en appliquant sur l'enveloppe du calorimètre un enroulement de fil de cuivre en sens opposé de celui de la pile thermoélectrique. Les tensions parasites induites au moment des mises en circuit et hors circuit des aimants pour déclencher le corps de chute, furent éliminées par des moyens supplémentaires; les mesures de déparasitage s'influençaient cependant l'une l'autre, de sorte que de petites impulsions de tension subsistaient quand même. La réalisation d'une nouvelle pile thermoélectrique à enroulement bifilaire aurait entraîné de telles modifications et difficultés de construction, qu'elle n'a pas non plus été effectuée.

Lors des expériences avec chauffage électrique du demi-calorimètre 1 (*fig. 1*) et chauffage mécanique du demi-calorimètre 2, le corps de chute fut arrêté dans 1 et le système de chauffe interrompu dans 2. Quand dans une deuxième série d'expériences, 1 est chauffé mécaniquement et 2 électriquement, la valeur moyenne résultant des deux expériences représente la valeur recherchée de l'équivalent de puissance mécanique et électrique, sans égard à de petites différences de la capacité thermique des deux demi-cylindres 1 et 2.

Les fluctuations et la marche des tensions dans la pile thermoélectrique, indiquées par le galvanomètre lors de l'essai de fonctionnement du calorimètre, s'expliquent en partie par les influences mentionnées ci-dessus et en partie par d'autres influences dont on n'a pas encore pu trouver l'explication jusqu'à présent. Il est possible aussi que la différence dans l'apport d'énergie, qui se produit continûment par le chauffage électrique et par

intermittence par le corps de chute, provoque, malgré l'amortissement des variations de température dans la masse de cuivre du calorimètre, des variations de tension qui soient encore enregistrées par le galvanomètre de grande période (30 s) employé. L'erreur relative qui en résulterait dans la détermination de l'ampère se situerait entre 10^{-4} et 10^{-3} et serait beaucoup plus grande que l'erreur théoriquement escomptée, de l'ordre de $2 \cdot 10^{-5}$. Bien qu'on ne soit pas encore à même de juger de l'utilité de la méthode, le travail commencé a été provisoirement interrompu.

(Juin 1957.)

ANNEXE E 14.

Laboratoire Central des Industries Électriques (France).

VÉRIFICATION DE LA CONSTANCE
DES ÉTALONS ÉLECTRIQUES (*)

Par P. DE LA GORCE et R. HÉROU.

1. *Rappel des comparaisons faites au Bureau International des Poids et Mesures depuis 1950.* — Les comparaisons extrêmement soignées qui sont faites périodiquement au B. I. P. M. entre les étalons de cet établissement et les copies des prototypes conservés dans les Laboratoires nationaux fournissent une indication très précieuse de la constance de ces prototypes.

Voici, pour le L. C. I. E., les résultats de ces mesures depuis 1950.

*Écarts entre les unités du L. C. I. E.
et les unités conservées au B. I. P. M.*

Années.	$\mu\Omega$.	μV .
1950.....	+ 1	— 0,1
1953.....	— 5	— 1,8
1955.....	— 6,3	— 1,8

L'examen des résultats obtenus pour les étalons de force électromotrice n'appelle aucune observation. Les variations, très faibles, ne laissent apparaître aucune dérive systématique.

En ce qui concerne les étalons de résistance, il semble qu'une baisse légère de l'unité conservée au L. C. I. E. soit intervenue, encore que le décrochage, de l'ordre de $7 \cdot 10^{-6}$, ne paraisse pas justifier un rajustement.

2. *Vérification de la constance de l'inductance étalon ayant servi de base en 1938 pour la détermination de l'ohm absolu en*

(*) Cette Annexe rassemble les deux Notes du L. C. I. E., la première présentée à la session du Comité Consultatif, la seconde (complément) distribuée après cette session.

France. — Il était donc intéressant de procéder à une détermination de la maintenance de l'étalon de résistance du L. C. I. E. par des comparaisons à l'étalon primaire d'inductance E qui a servi de base pour la détermination de l'ohm absolu français en 1938 (1).

Bien entendu, une détermination préliminaire s'imposait pour vérifier que l'étalon d'inductance E s'était conservé sans modification sensible. Elle consistait à comparer l'étalon E à un autre étalon d'inductance E', de 18 mH, à une seule couche sur noyau de silice.

Le tableau suivant indique les différences E' — E trouvées au cours de trois comparaisons en 1938, en 1949 et en 1957.

1938.....	0,12 μ H
1949.....	0,14
1957.....	0,16

Les faibles écarts relatifs constatés (de l'ordre de 2 millièmes) permettent de présumer la stabilité des deux bobines, celles-ci étant de modes de construction et de dimensions différents.

3. *Comparaison de l'unité de résistance L. C. I. E. à l'inductance étalon de 1938.* — La comparaison de l'étalon de résistance à l'étalon d'inductance E supposé invariable a été faite en utilisant la méthode adoptée en 1938, après avoir apporté aux anciens dispositifs de mesure les quelques modifications suivantes :

a. Les connexions reliant aux ponts de mesure les deux bobines d'inductance des mutuelles ont été améliorées en vue d'éliminer les couplages parasites.

Les conducteurs concentriques utilisés précédemment ont été remplacés par des câbles coaxiaux de télécommunication isolés au polyéthylène; diverses connexions intermédiaires, constituées par des conducteurs torsadés, ont été éliminées.

b. Les connexions et les résistances de compensation des constantes de temps, primitivement réalisées par des circuits rectangulaires, ont été remplacées par des câbles coaxiaux et des résistances bifilaires à faible inductance sur résine acrylique.

Les caractéristiques de ces éléments, qui entrent dans le calcul des corrections, étaient déterminées par des mesures électriques.

Les mesures ainsi effectuées avec des précisions de l'ordre

(1) JOUAUST (R.), PICARD (M.) et HÉROU (R.), Détermination de l'unité de résistance du système électromagnétique C. G. S., *Bull. Soc. Fr. Électriciens*, juillet 1938, n° 91.

de quelques centièmes de microhenry n'entraînaient que des erreurs voisines de 1 à $2 \cdot 10^{-6}$ sur la détermination des inductances.

Ce procédé expérimental semble donner une meilleure précision que les calculs classiques basés sur la connaissance des dimensions géométriques.

Les caractéristiques mesurées pour les éléments de 1957, et celles calculées pour les éléments de 1938, sont reportées au tableau ci-dessous avec les mêmes notations que celles qui ont été utilisées en 1938 (1).

Signalons enfin que la nouvelle résistance r_1 de 60Ω a été spécialement étudiée pour présenter des impuretés très réduites; le bobinage était du type Chaperon à deux fils en parallèle.

Éléments utilisés	En 1938 (p. 11).	En 1957 (p. 11).
Connexion E.....	1,67	— 0,45 (*)
Rectangle E.....	0,35	1,35
Rectangle l	1,55	1,02
Rectangle l_1	1,57	2,50
Résistance r_1 {		
λ	0,16	0,05
λ_1	2,00	— 0,27

(*) Compte tenu de la capacité du câble coaxial.

Le signe —, dû à la capacité de certains éléments, indique une inversion du signe des corrections de 1938.

c. Les amplificateurs reliant le pont au galvanomètre et au générateur de courant étaient alimentés par le réseau à 50 Hz, toutes précautions étant prises pour éviter les interactions parasites avec le réseau, en particulier : chauffage en haute fréquence des tubes électroniques de l'amplificateur de mesures, filtrage très élaboré de l'amplificateur de puissance réduisant le niveau de parasites à 70 dB au-dessous de la puissance d'alimentation.

Le démultiplicateur de fréquence 1 000 Hz/100 Hz était également alimenté par le réseau 50 Hz.

Malgré le rapport 2 entre la fréquence du courant de mesure et celle du réseau d'alimentation, aucune perturbation notable due au réseau n'était apportée aux mesures effectuées avec une sensibilité de l'ordre du millionième.

4. *Résultats obtenus.* — Les procédés de calcul étant identiques à ceux qui ont déjà été exposés dans notre Mémoire de 1938, nous indiquons ci-dessous la moyenne des résultats obtenus :

Ohm absolu français = 0,999 98 ohm absolu déduit de la valeur
de l'inductance de base (1938).

Cette moyenne est à substituer au résultat provisoire indiqué dans notre première Note présentée au Comité Consultatif de

juin 1957. Ce résultat repose sur un certain nombre de mesures (dix environ) dont plusieurs, effectuées en courant alternatif, étaient susceptibles d'une indétermination de quelques millièmes due principalement au léger échauffement, par effet Joule, des circuits de mesure pendant les opérations d'équilibrage.

Il s'ensuit que, dans le cas présent, le but recherché qui était de contrôler la maintenance des étalons de résistance par comparaison à une bobine d'inductance de base, n'a pu être atteint avec le haut degré d'exactitude exigé.

Pour confirmer ou infirmer la variation de $7 \cdot 10^{-6}$ constatée sur notre unité de résistance entre 1950 et 1955, une recherche systématique serait nécessaire pour éliminer les causes d'erreur.

Cette recherche pourrait s'inscrire dans le cadre plus général d'une intercomparaison des étalons d'inductance ou de capacité des différents Laboratoires nationaux, conformément au vœu exprimé par le Comité Consultatif d'Électricité en juin 1957.

(Octobre 1957.)

Electrotechnical Laboratory (Japon).

RECHERCHES SUR LES MATÉRIAUX
POUR RÉSISTANCES ÉLECTRIQUES (*)

On a étudié la manganine et les nouveaux alliages Cu-Mn contenant du silicium, de l'étain et du germanium, qui sont utilisés pour la construction des résistances étalons. Les résultats obtenus sont les suivants :

1. L'influence de l'addition d'éléments et des traitements mécanique et thermique sur les propriétés électriques et la stabilité de la manganine a été élucidée et les meilleurs compositions et traitements ont été fixés; on a mis ainsi au point un alliage de Cu contenant : Mn 12 %, Ni 2 %, Fe 0,25 %, Si 0,1 %, recuit à haute température après une faible diminution de la section du fil par écrouissage.

2. Les propriétés électriques des alliages Cu-Mn contenant une petite quantité de silicium, d'étain et de germanium sont très voisines de celles de la manganine, et les meilleures compositions de ces alliages ont été fixées. La particularité remarquable de ces alliages est l'obtention de coefficients de température positif, nul ou négatif et une meilleure linéarité de la relation résistance-température. Les alliages contenant du germanium sont particulièrement prometteurs pour la réalisation d'étalons de résistance.

(Mars 1957.)

(*) Résumé du document en langue anglaise distribué aux Membres du Comité Consultatif d'Électricité. Ces travaux ont été publiés par ailleurs en langue japonaise dans *Bull. Electrotechnical Laboratory*, 17, 1953, p. 111; 18, 1954, p. 161, 165, 168; *J. Soc. Instrum. Technology*, Japan, 7, 1957, p. 37.

ANNEXE E 16.

Bureau International des Poids et Mesures.

ESSAIS DE CONSTRUCTION D'ÉTALONS MATÉRIELS DE L'OHM

Par G. LECLERC.

La manganine demeure, à notre avis, le matériau de choix pour la fabrication des étalons de résistance électrique. Son coefficient de température peut être rendu très faible (quelques millièmes par degré) et sa stabilité dans le temps paraît être l'une des meilleures que l'on connaisse; elle est supérieure à celle de tous les autres alliages proposés, y compris les échantillons d'or-chrome que nous avons eu l'occasion d'étudier (dont le coefficient de température, par contre, était pratiquement nul).

Il ne s'agit pas, par conséquent, de trouver un matériau de remplacement, mais d'étudier plus complètement les propriétés de la manganine; plus précisément de chiffrer son évolution. Le problème est actuellement très difficile à résoudre faute de référence; les déterminations absolues de l'ohm ne sont pas, en effet, assez précises (10^{-5} au mieux) pour mettre en évidence les variations très faibles (probablement de l'ordre de quelques 10^{-7} par an) des étalons matériels en manganine qui « conservent » l'unité de résistance dans les différents laboratoires nationaux.

Pour contrôler la stabilité de la manganine nous avons donc pensé recourir à des métaux très purs, de préférence nobles; ces derniers devraient avoir moins de raisons que les alliages d'évoluer dans le temps.

Mais les métaux purs ont tous un coefficient de température élevé. Ce grave inconvénient oblige à mesurer la température d'un fil métallique, généralement peu accessible, avec une grande précision : à quelques dix-millièmes de degré si l'on prétend déterminer la résistance au millionième près. La meilleure solution consiste à effectuer les mesures à la température d'un point fixe thermométrique reproductible avec une telle précision, par exemple celle du point triple de l'eau.

C'est en partant de ces considérations que nous avons entrepris, dans une première étape, la construction d'un étalon à fil de platine et d'un étalon à mercure dans un tube de pyrex.

Dans un modèle présenté au Comité International en octobre 1956, le fil de platine, d'un diamètre de 0,5 mm, était logé à l'intérieur d'un récipient en pyrex rempli d'argon, récipient lui-même enfermé dans une cellule pour point triple de l'eau, également en pyrex. La réalisation en fut difficile à cause du grand nombre de soudures à effectuer, l'étalon étant du type « à quatre conducteurs » (deux arrivées de courant et deux prises de potentiel). La pièce dut être recommencée plusieurs fois. D'autre part, l'ajustage de la résistance à la valeur désirée pose un problème qui n'est pas résolu; les opérations de recuit du verre, indispensables en fin de fabrication, modifient la résistance du platine de quantités imprévisibles, or il n'est plus possible ensuite d'avoir accès au fil. Notre premier instrument, par exemple, a une valeur beaucoup trop faible.

Pour ces raisons, nous avons renoncé à poursuivre la construction d'étalons sur ce modèle et nous sommes revenus à une conception plus classique. Dans l'étalon que nous réalisons actuellement, le fil de platine, de 0,7 mm de diamètre (section double de celle du fil utilisé précédemment) et d'une pureté telle que $\frac{R_{100}}{R_0} > 1,391$, sera maintenu dans une double hélice (pour réduire la self-induction) ménagée à la surface d'un manchon en silice fondue opaque d'environ 100 mm de hauteur, 80 mm de diamètre extérieur et 5 mm d'épaisseur. Le fil sera recuit sur son support, puis l'ensemble sera enfermé dans un récipient étanche en laiton rempli d'hélium. Au cours des mesures l'étalon sera placé dans une cellule à point triple de l'eau, construite spécialement pour le recevoir.

Parallèlement à ces essais nous poursuivons la construction d'un « ohm » à mercure. Son ajustage s'effectue par approximations successives, en modifiant les dimensions géométriques du tube de pyrex par chauffage à la flamme. On l'enfermera ensuite dans une cellule à point triple.

Nous ne disposons encore d'aucun étalon terminé. Les réalisations en cours sont lentes parce qu'une partie du travail doit être effectuée hors du Bureau International et que les constructeurs, malgré leur bonne volonté, ne peuvent pas donner la priorité à nos commandes, toujours délicates et difficiles à exécuter. Nous espérons cependant obtenir des résultats satisfaisants avant la fin de 1957.

(25 mai 1957.)

ANNEXE E 17.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Allemagne).

PROPOSITION CONCERNANT LA RÉALISATION
DE RÉSISTANCES ÉLECTRIQUES ÉTALONS

Par H. E. LINCKH.

Pour la réalisation matérielle de la résistance électrique on emploie des alliages, tels que la manganine, dont le coefficient de température peut être diminué par un dosage convenable des composants et par un traitement approprié. Mais il est possible que ces alliages subissent des variations temporaires, non décelables au moyen de mesures relatives où n'interviennent que des résistances de même nature. En comparant des groupes de résistances en métaux purs et des groupes de résistances en alliages, nous obtiendrons des renseignements importants sur la stabilité des groupes.

On peut compenser le coefficient de température en mettant en circuit un métal pur et un matériau ayant un coefficient de température négatif. R. Vieweg et Hildebrand ont proposé un tel arrangement ⁽¹⁾ pour mesurer la pression par des résistances métalliques, qu'il fallait absolument soustraire à l'influence de la température.

Une autre possibilité de compensation, proposée par W. Hetzel (P. T. B.), emploie un quadripôle qui se compose de deux circuits dans lesquels deux résistances de métaux purs différents, par exemple platine et nickel, sont connectées en série de telle manière que le courant s'écoule du platine vers le nickel dans l'un des circuits, et du nickel vers le platine dans l'autre. Les deux résistances d'un même métal sont égales, mais les valeurs des résistances de platine sont différentes de celles des résistances de nickel. Le quadripôle est alimenté au moyen de deux bornes placées vis-à-vis, tandis que les deux bornes restantes sont employées comme prises de potentiel.

(1) *Kunststoffe*, 30, 1940, p. 173.

A l'aide de cet arrangement quadripôle on peut compenser le coefficient linéaire de température, pour une température arbitrairement choisie t_0 , en adoptant convenablement la grandeur relative des résistances de platine et de nickel. Cet arrangement a l'avantage d'être réalisable avec des métaux purs.

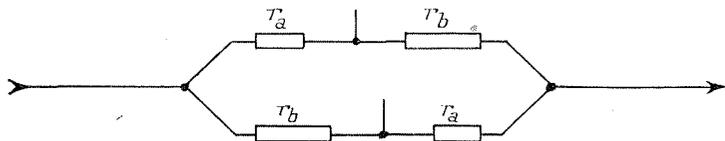


Fig. 1.

En fonction de la température t la valeur de chaque résistance de platine est

$$(1) \quad r_{a,t} = r_a [1 + \alpha_a(t - t_0) + \beta_a(t - t_0)^2],$$

et celle de chaque résistance de nickel

$$(2) \quad r_{b,t} = r_b [1 + \alpha_b(t - t_0) + \beta_b(t - t_0)^2],$$

$r_a, r_b, \alpha_a, \alpha_b, \beta_a, \beta_b$ étant les valeurs des résistances et de leurs coefficients thermiques pour la température $t_0 = 20^\circ \text{C}$ par exemple.

Si l'on fait

$$(3) \quad \frac{r_a}{r_b} = \frac{\alpha_b}{\alpha_a},$$

on trouve pour la résistance interne

$$(4) \quad r_{n,t} = \frac{r_a}{2} \frac{\alpha_b - \alpha_a}{\alpha_b} \left[1 + \frac{\alpha_b \beta_a - \alpha_a \beta_b}{\alpha_b - \alpha_a} (t - t_0)^2 \right] \\ = r_n [1 + \beta_n (t - t_0)^2],$$

β_n étant de l'ordre de grandeur de $20 \cdot 10^{-6} (\text{degré})^{-2}$ pour un modèle en cuivre et nickel, il en résulte qu'il suffit de régler à un dixième de degré près la température t , voisine de t_0 , pour avoir la précision de $0,2 \cdot 10^{-6}$; un tel réglage s'obtient facilement avec un thermostat ordinaire.

Les relations établies ci-dessus ne sont rigoureusement valables que dans le cas de mesures avec un potentiomètre.

(Avril 1957.)

COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ

8^e Session (1957).

	Pages.
Liste des Membres.....	E 3
Ordre du Jour.....	6
Procès-verbal de la séance, jeudi 6 juin 1957.....	7
Résultats des comparaisons internationales de 1953 et de 1955 et unification des unités électriques (Concordance satisfaisante des unités. Réajustement de l'ohm du D. A. M. G. Maintien des valeurs actuelles des unités nationales).....	8
Comparaisons futures (Espacement des comparaisons internationales : prochaine comparaison en 1961).....	9
Travaux sur les unités absolues (Déterminations absolues de l'ampère et de l'ohm dans les Laboratoires nationaux).....	10
Propositions de l'Institut de Métrologie de l'U. R. S. S. sur la réalisation et la comparaison des unités électriques (Détermination simultanée, par les Laboratoires nationaux, de la valeur absolue de leurs étalons de l'ohm et du volt et comparaison circulaire de ces étalons. Approbation d'un projet de comparaison internationale d'étalons de capacité).....	12
Matériaux pour étalons de résistance (Recherches dans différents pays : alliages japonais. Études du Bureau International pour la réalisation d'étalons de référence en métaux purs. Réalisation à la P. T. B. d'un étalon sous la forme d'un quadripôle thermiquement compensé).....	13
Installations du Bureau International (Instrument pour le passage de 1 à 100 Ω offert par le National Standards Laboratory d'Australie) ..	14
Huitième Rapport du Comité Consultatif d'Électricité au Comité International des Poids et Mesures; par P. de la Gorée	16
Annexes des Procès-Verbaux du Comité Consultatif d'Électricité.	21
NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (Royaume-Uni) :	
E 1. <i>Observations sur le groupe de référence de piles étalons utilisées au National Physical Laboratory pour la conservation du volt; par L. Hartshorn et J. J. Denton...</i>	21

	Pages.
E 2. <i>Comportement des résistances étalons en manganine utilisées pour la conservation de l'ohm</i> ; par L. Hartshorn et J. J. Denton.....	E 33
E 3. <i>Travaux récents sur les mesures électriques absolues au National Physical Laboratory</i> ; par G. H. Rayner.....	31
E 4. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS (États-Unis d'Amérique). — <i>État actuel des mesures électriques absolues au National Bureau of Standards</i> ; par R. L. Driscoll, J. L. Thomas et R. D. Cutkosky.....	36
E 5. NATIONAL RESEARCH COUNCIL (Canada). — <i>Détermination absolue de l'unité de résistance électrique</i> ; par M. Romanowski et N. Olson.....	48
INSTITUT DE MÉTROLOGIE D. I. MENDÉLÉEV (U. R. S. S.) :	
E 6. <i>Travaux de l'Institut de Métrologie sur l'établissement des étalons des unités électriques absolues et propositions au Comité Consultatif d'Électricité</i> ; par E. Chramkov...	51
E 7. <i>Balance de courant et établissement de la valeur de l'étalon du volt</i> ; par S. Gorbatzevitch, V. Muller et P. Loukianov.....	54
E 8. <i>Réalisation de l'unité absolue de résistance électrique</i> ; par I. Krotkov, S. Gorbatzevitch, B. Ianowski et N. Amatouni.	61
E 9. <i>Étalon primaire de l'unité d'inductance de l'U. R. S. S.</i> ; par I. Krotkov.....	69
E 10. <i>Étalon primaire de l'unité de capacité de l'U. R. S. S.</i> ; par I. Krotkov.....	72
E 11. <i>Comparateur pour éléments normaux étalons</i> ; par Z. Zélikovski.....	75
E 12. ELECTROTECHNICAL LABORATORY (Japon). — <i>État actuel de la détermination absolue de l'ohm à l'Electrotechnical Laboratory</i> (Résumé).....	80
E 13. DEUTSCHES AMT FÜR MASS UND GEWICHT (Allemagne). — <i>Travaux exécutés au calorimètre différentiel pour déterminer l'ampère absolu</i> ; par D. Bender.....	83
E 14. LABORATOIRE CENTRAL DES INDUSTRIES ÉLECTRIQUES (France). — <i>Vérification de la constance des étalons électriques</i> ; par P. de la Gorce et R. Hérou.....	90
E 15. ELECTROTECHNICAL LABORATORY (Japon). — <i>Recherches sur les matériaux pour résistances électriques</i> (Résumé).....	94
E 16. BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES. — <i>Essais de construction d'étalons matériels de l'ohm</i> ; par G. Leclerc.	95
E 17. PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (Allemagne). — <i>Proposition concernant la réalisation de résistances électriques étalons</i> ; par H. E. Linckh.....	97