

COMITÉ CONSULTATIF  
D'ÉLECTRICITÉ

AUPRÈS DU

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

---

9<sup>e</sup> SESSION — 1961

(5 octobre)



PARIS

GAUTHIER-VILLARS & C<sup>ie</sup>

IMPRIMEUR-ÉDITEUR DU BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

55, Quai des Grands-Augustins.



COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ

SESSION DE 1961

---

---

## NOTE

---

A partir de cette session, les travaux du *Comité Consultatif d'Électricité* sont publiés dans une série indépendante, et non plus dans les Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures.

Les travaux des précédentes sessions de ce Comité Consultatif ont été publiés dans les *Procès-Verbaux du Comité International des Poids et Mesures*, 2<sup>e</sup> série :

- tome 13, p. 77 à 197 (1<sup>re</sup> Session, 1928);
- » 14, p. 75 à 318 (2<sup>e</sup> Session, 1930);
- » 15, p. 137 à 206 et 16, p. 1 à 222 (3<sup>e</sup> Session, 1933);
- » 17, p. 151 à 360 (4<sup>e</sup> Session, 1935);
- » 18, p. 103 à 208 (5<sup>e</sup> Session, 1937);
- » 19, p. E 1 à E 101 (6<sup>e</sup> Session, 1939);
- » 23-B, p. E 1 à E 131 (7<sup>e</sup> Session, 1952);
- » 26-B, p. E 1 à E 98 (8<sup>e</sup> Session, 1957).

Par simplification, le Comité International des Poids et Mesures a par ailleurs décidé (*Procès-Verbaux C. I. P. M.*, 1961, 29, p. 37) la suppression des procès-verbaux détaillés des séances des Comités Consultatifs; les Rapports des Comités Consultatifs au Comité International tiennent lieu de procès-verbal simplifié.

---

---

## AVERTISSEMENT HISTORIQUE

---

Le Bureau International des Poids et Mesures a été créé par la *Convention du Mètre* signée à Paris le 20 mai 1875 par dix-sept États, lors de la dernière séance de la Conférence Diplomatique du Mètre. Cette Convention a été modifiée en 1921.

Le Bureau International a son siège près de Paris, dans le domaine du Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) mis à sa disposition par le Gouvernement français; son entretien est assuré à frais communs par les États membres de la Convention du Mètre <sup>(1)</sup>.

Le Bureau International a pour mission d'assurer l'unification mondiale des mesures physiques; il est chargé

- d'établir les étalons fondamentaux et les échelles des principales grandeurs physiques, et de conserver les prototypes internationaux;
- d'effectuer la comparaison des étalons nationaux et internationaux;
- d'assurer la coordination des techniques de mesure correspondantes;
- d'effectuer et de coordonner les déterminations relatives aux constantes physiques fondamentales.

Le Bureau International fonctionne sous la surveillance exclusive d'un *Comité International des Poids et Mesures*, placé lui-même sous l'autorité d'une *Conférence Générale des Poids et Mesures*.

La Conférence Générale est formée des délégués de tous les États membres de la Convention du Mètre et se réunit au moins une fois tous les six ans. Elle reçoit à chacune de ses sessions le Rapport du Comité International sur les travaux accomplis, et a pour mission :

- de discuter et de provoquer les mesures nécessaires pour assurer la propagation et le perfectionnement du Système Métrique;
- de sanctionner les résultats des nouvelles déterminations métrologiques fondamentales et les diverses résolutions scientifiques de portée internationale;
- d'adopter les décisions importantes concernant l'organisation et le développement du Bureau International.

---

(<sup>1</sup>) Au 31 décembre 1961, trente-huit États sont membres de cette Convention : Allemagne, Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Canada, Chili, Corée, Danemark, Dominicaine (Rép.), Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Irlande, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U. R. S. S., Uruguay, Vénézuéla, Yougoslavie.

Le Comité International est composé de dix-huit membres appartenant à des États différents; il se réunit normalement tous les deux ans. Le bureau de ce Comité adresse aux Gouvernements des États membres de la Convention du Mètre un *Rapport Annuel* sur la situation administrative et financière du Bureau International.

Devant l'extension des tâches confiées au Bureau International, le Comité International a institué depuis 1927, sous le nom de *Comités Consultatifs*, des organes destinés à le renseigner sur les questions qu'il soumet, pour avis, à leur examen. Ces Comités Consultatifs sont chargés de coordonner les travaux internationaux effectués dans leurs domaines respectifs et de proposer des recommandations concernant les modifications à apporter aux définitions et aux valeurs des unités, en vue des décisions que le Comité International est amené à prendre directement ou à soumettre à la sanction de la Conférence Générale pour assurer l'unification mondiale des unités de mesure.

Les Comités Consultatifs, dont la présidence est généralement confiée à un Membre du Comité International, ont un règlement commun (*Procès-Verbaux C. I. P. M.*, 1952, 23-A, p. 108); ils sont composés d'un délégué de chacun des grands Laboratoires métrologiques nationaux, de représentants d'Organisations et d'Instituts spécialisés et de spécialistes nominativement désignés. Ces Comités tiennent leurs sessions selon une périodicité irrégulière; ils sont actuellement au nombre de six :

1. Le *Comité Consultatif d'Électricité*, créé en 1927.
2. Le *Comité Consultatif de Photométrie*, créé en 1933 (de 1930 à 1933 le Comité précédent s'est occupé des questions de photométrie).
3. Le *Comité Consultatif de Thermométrie*, créé en 1937.
4. Le *Comité Consultatif pour la Définition du Mètre*, créé en 1952.
5. Le *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde*, créé en 1956.
6. Le *Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Radiations Ionisantes*, créé en 1958.

Les travaux de la Conférence Générale, du Comité International, des Comités Consultatifs et du Bureau International sont publiés par les soins de ce dernier dans les collections suivantes

- *Comptes Rendus des séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures*;
- *Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures*;
- *Sessions des Comités Consultatifs*;
- *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (périodicité irrégulière).

Le Bureau International présente en outre à la Conférence Générale un *Rapport* sur les développements du *Système Métrique* dans le monde, *Rapport* publié sous le titre : *Les récents progrès du Système Métrique*.

---

**PRÉSIDENT**  
**du Comité International des Poids et Mesures**

R. VIEWEG

---

LISTE DES MEMBRES

DU

**COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ**

---

*Président*

R. VIEWEG, Professeur à l'École Polytechnique, Membre du Conseil de la Physikalisch-Technische Bundesanstalt, *Darmstadt*.

*Membres*

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [P. T. B.], *Braunschweig* (H. HOYER, Chef de la Section des Étalons en courant alternatif).

DEUTSCHES AMT FÜR MESSWESEN [D. A. M.], *Berlin*.

NATIONAL STANDARDS LABORATORY [N. S. L.], *Chippendale*, N. S. W.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL [N. R. C.], *Ottawa* (A. F. DUNN).

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [N. B. S.], *Washington 25*, D. C. (C. H. PAGE, Chief, Electricity Division).

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS, *Paris* (P. OLMER, Directeur du Laboratoire Central des Industries Électriques, *Fontenay-aux-Roses*; R. HÉROU et N. ELNÉKAVÉ, Chefs de Service au L. C. I. É.).

ISTITUTO ELETTROTECHNICO NAZIONALE GALILEO FERRARIS [I.E.N.], *Torino* (P. LOMBARDI, Co-Directeur; M<sup>lle</sup> M. CAREGGIO, Chercheur).

ELECTROTECHNICAL LABORATORY [E. T. L.], *Tokyo*.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [N. P. L.], *Teddington* (P. VIGOUREUX, Senior Principal Scientific Officer).

INSTITUT DE MÉTROLOGIE D. I. MENDÉLÉEV [I. M. M.], *Leningrad* (V. O. AROUTONOV, Directeur; M. A. BYKOV, Chef de la Section des Mesures Électriques; G. K. IAGOLA, Directeur de l'Institut de Kharkov).

Le Directeur du BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES [B. I. P. M.], *Sèvres* (Ch. VOLET).

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

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



## ORDRE DU JOUR DE LA SESSION

---

1. Comparaisons internationales 1960-1961 des étalons de résistance et de force électromotrice.
  2. Déterminations absolues de l'ohm et du volt.
  3. Comparaisons d'étalons de résistance autres que ceux de 1 ohm.
  4. Progrès sur les matériaux pour résistances étalons.
  5. Avancement des comparaisons internationales des étalons de capacité et possibilité d'élargir ces comparaisons.
  6. Coefficient gyromagnétique du proton.
  7. Possibilité d'organiser des comparaisons internationales de grandeurs électriques et magnétiques, telles que  $L$ ,  $H$ ,  $\Phi$ ,  $\text{tg } \delta$ .
  8. Questions diverses.
-

# COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ

---

## 9<sup>e</sup> SESSION (1961)

---

### NEUVIÈME RAPPORT

AU

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Par P. VIGOUREUX, Rapporteur

---

Le Comité Consultatif d'Électricité a tenu sa neuvième session au Pavillon de Breteuil à Sèvres, au cours de deux séances le jeudi 5 octobre 1961, sous la présidence de Mr R. VIEWEG.

Étaient présents : Mr VIEWEG, Président; MM. AROUTUNOV BYKOV, M<sup>lle</sup> CAREGGIO, MM. DUNN, ELNÉKAVÉ, HÉROU, HOYER, IAGOLA, LOMBARDI, OLMER, PAGE, VIGOUREUX, VOLET, Membres du Comité Consultatif.

Assistaient à la séance : Mr ASTIN, Membre du Comité International des Poids et Mesures; MM. TERRIEN, Sous-Directeur du Bureau International, et LECLERC (Bureau International); M<sup>me</sup> LAPOVOC et Mr WAIT, interprètes.

MM. KÖNIG, YOVANOVITCH et les représentants du Deutsches Amt für Messwesen, de l'Electrotechnical Laboratory et du National Standards Laboratory s'étaient excusés.

Mr VIGOUREUX (assisté de Mr LECLERC comme secrétaire) est nommé Rapporteur.

Avant d'aborder l'ordre du jour, Mr le PRÉSIDENT demande d'observer quelques instants de recueillement à la mémoire de deux Membres disparus, P. de la Gorce et C. Budeanu.

**Comparaisons internationales  
des étalons de résistance et de force électromotrice**

(*Annexes 1, 2*)

Le Bureau International donne les résultats des comparaisons de 1960-1961. Ces résultats, qui ne font apparaître qu'une évolution relative lente et régulière des unités des divers laboratoires depuis 1953, sont jugés satisfaisants par le Comité Consultatif, dont les membres sont d'accord pour que ces comparaisons se poursuivent comme par le passé et que les unités nationales continuent à être rapportées à celles du Bureau International.

A la suite d'une question de Mr le PRÉSIDENT, il apparaît que plusieurs Laboratoires qui se procurent encore des étalons de fabrication industrielle souhaitent parvenir à les réaliser eux-mêmes dans l'avenir. Le Bureau International émet le vœu que les Laboratoires qui fabriquent leurs éléments Weston en mettent quelques-uns à sa disposition.

A la demande du Bureau International, le Comité Consultatif prie les Laboratoires de préciser dans leurs certificats la température à laquelle leurs mesures sont effectivement faites.

**Déterminations absolues de l'ohm et du volt**

(*Annexes 3, 4, 5*)

Des mesures absolues sont actuellement envisagées par un certain nombre de Laboratoires, mais dans la plupart des cas les résultats ne seront connus que dans plusieurs mois, voire quelques années. Mr le PRÉSIDENT fait remarquer que de nouvelles méthodes (coefficient gyromagnétique du proton, capacité calculable suggérée par le National Standards Laboratory) permettent maintenant de déterminer les unités absolues avec une précision bien supérieure à celle qui est fournie par la balance de courant et l'inductance calculable. Le National Bureau of Standards confirme qu'il a déjà déterminé l'ohm avec une précision d'un millionième au moyen d'une capacité calculable.

L'Institut de Métrologie D. I. Mendéléev suggère un programme pour la comparaison des résultats de mesures absolues

faites dans les divers Laboratoires (p. 102). Après discussion et sur proposition de Mr le PRÉSIDENT, il est convenu que le Bureau International distribuera la proposition de l'Institut de Métrologie aux Laboratoires; ceux-ci feront parvenir leurs remarques au Bureau International.

**Comparaisons d'étalons de résistance  
autres que ceux de 1 ohm**

La proposition de l'Electrotechnical Laboratory du Japon (p. 101) d'étendre les comparaisons internationales à des étalons de résistance autres que ceux de 1  $\Omega$  donne lieu à une discussion, d'où il ressort que la plupart des membres en admettent l'utilité, mais ne sont pas d'accord sur la marche à suivre pour les effectuer. Mr le PRÉSIDENT fait observer que les moyens limités du Bureau International ne lui permettraient pas de répéter pour les multiples ou sous-multiples de l'ohm les comparaisons très complètes faites tous les trois ans sur les étalons de 1  $\Omega$ . Cependant, le Bureau International peut dès maintenant comparer à ses propres étalons de 0,1, 10 et 100  $\Omega$  ceux que les laboratoires lui adresseraient.

Il est décidé que le Bureau International soumettra la proposition de l'E. T. L. et celles qui furent faites au cours de la discussion aux Laboratoires nationaux afin que ceux-ci lui communiquent leurs remarques.

**Progrès sur les métaux pour résistances étalons**

(Annexes 6, 7)

Le Comité Consultatif examine les documents décrivant les recherches sur l'emploi d'alliages et de métaux purs pour résistances étalons. Mr le PRÉSIDENT remarque que la connaissance de la physique des métaux a fait de grands progrès dans ces dernières années et devrait conduire à la réalisation de matériaux mieux appropriés à la fabrication d'étalons, mais que la manganine s'est révélée si satisfaisante qu'il sera sans doute difficile de trouver mieux. Néanmoins, on doit poursuivre les recherches aussi bien sur les métaux purs que sur les alliages. Plusieurs membres pensent qu'il y a corrélation étroite entre la composition et le comportement des matériaux employés dans la construction d'étalons de résistance, et qu'une analyse précise est indispensable à leur amélioration.

**Avancement des comparaisons internationales  
d'étalons de capacité et possibilité  
d'élargir ces comparaisons**

(Annexes 8, 9, 10, 11)

Le Comité Consultatif prend connaissance des Rapports des Laboratoires qui ont participé aux comparaisons circulaires des condensateurs de  $0,1 \mu\text{F}$ . Les écarts observés peuvent provenir des méthodes de mesure ou de l'évolution des capacités. Sur la proposition de l'Institut de Métrologie D. I. Mendéléev les Laboratoires sont priés de fournir des Rapports détaillés sur les méthodes de mesure employées. D'autre part, après discussion, il est décidé que les condensateurs seront renvoyés à l'Institut de Métrologie à la suite des mesures du Laboratoire Central des Industries Électriques et du National Physical Laboratory; si les nouveaux résultats de l'Institut de Métrologie indiquent un comportement satisfaisant, les condensateurs pourront ensuite être envoyés aux Laboratoires plus lointains.

A la demande du National Bureau of Standards (p. 103), il est décidé d'envisager la mise en circulation de condensateurs de l'ordre de  $1 \text{ pF}$  lorsque les comparaisons en cours seront terminées. D'autre part, pour répondre à un vœu de l'Istituto Elettrotecnico Nazionale, il est convenu que le Bureau International soumettra prochainement un questionnaire aux Laboratoires leur demandant de lui indiquer à quelle date ils pensent être en mesure de faire de telles comparaisons.

**Le coefficient gyromagnétique du proton**

(Annexes 12, 13, 14, 15)

Après avoir pris connaissance des résultats des mesures récentes du coefficient gyromagnétique du proton et de leur intérêt, le Comité Consultatif décide de constituer un Groupe de travail dont les fonctions seront d'étudier les méthodes de mesure et d'analyser leurs résultats. Les membres de ce Groupe devront être des spécialistes ayant participé aux expériences.

Mr le PRÉSIDENT proposera au Comité International que Mr Vigoureux soit président de ce Groupe (1).

---

(1) Note ajoutée aux épreuves. — Ce Groupe de travail a la composition suivante : P. VIGOUREUX (N. P. L.), Président, H. CAPPTULLER (P. T. B.), P. L. BENDER (N. B. S.), J. T. HENDERSON (N. R. C.), K. HARA (E. T. L.), B. M. YANOVSKY (I. M. M.).

**Possibilité d'organiser des comparaisons internationales  
de grandeurs électriques et magnétiques,  
telles que L, H,  $\Phi$ ,  $\text{tg } \delta$**

La discussion sur l'opportunité d'organiser des comparaisons de grandeurs telles que L, H,  $\Phi$ ,  $\text{tg } \delta$  montre que les avis sont partagés. Plusieurs Laboratoires pensent qu'il n'est pas du ressort du Comité International de s'occuper de la mesure de grandeurs « secondaires ». Mr le PRÉSIDENT fait remarquer que la mesure du coefficient gyromagnétique du proton est presque équivalente à celle de H.

Sur la proposition de Mr le PRÉSIDENT, il est recommandé que, provisoirement, les Laboratoires qui désirent effectuer de telles comparaisons les organisent entre eux.

**Comparaison internationale des grandeurs  
dans le domaine des radiofréquences**

Le Comité Consultatif examine la proposition de l'Electrotechnical Laboratory concernant l'extension de sa compétence aux grandeurs dans le domaine des radiofréquences (p. 102); il décide de soumettre cette question au Comité International, qui est déjà saisi d'une proposition identique par Mr Astin.

Le Comité Consultatif charge son Président de fixer la date de sa prochaine session.

Mr le PRÉSIDENT remercie les membres du Comité Consultatif de leur collaboration, puis Mr LOMBARDI se fait l'interprète de ses collègues pour remercier Mr Vieweg de la façon dont il a conduit les travaux.

(Sèvres, 6 octobre 1961)



## ANNEXE 1

Bureau International des Poids et Mesures

---

# RAPPORT SUR LES COMPARAISONS DES ÉTALONS NATIONAUX DE RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE

(novembre 1960-mars 1961)

Par G. LECLERC

---

A l'exception du Deutsches Amt für Messwesen, empêché, tous les Laboratoires nationaux pressentis, en particulier le National Standards Laboratory (Australie) et l'Istituto Elettrotecnico Nazionale (Italie) invités pour la première fois, ont participé à ces comparaisons. Dès le 8 novembre 1960, les vingt-quatre étalons voyageurs des neuf laboratoires participants étaient parvenus à Sèvres (voir tableau I) et les comparaisons commencèrent à partir du 14 novembre.

Tous les étalons présents étaient de premier ordre : en manganine, à quatre bornes, du type hermétiquement fermé (sauf le N° 3961). Pendant toute la durée de leur séjour au Bureau International, ils ont été conservés dans un bain d'huile de paraffine maintenu à une température de  $20 \pm 0,2^\circ\text{C}$ .

Les comparaisons ont été effectuées au moyen d'un pont double (bras de  $1000 \Omega$ ), par la méthode de « substitution » ; les deux étalons comparés au cours de chaque série de mesures étaient alternativement montés dans le même bras du pont (bras « mesure ») et l'équilibre était réalisé pour chacun d'eux en modifiant la valeur de la résistance tare placée dans l'autre bras ; deux équilibrages accessoires et rapides permettaient dans chaque cas d'éliminer l'influence des résistances parasites (prises de potentiel des instruments étudiés et contacts).

Comme par le passé, on a utilisé un courant de mesure de  $0,1$  A dont la millième partie, dérivée par l'une des prises de potentiel de l'étalon mesuré, traversait les bras principaux du pont double.

TABLEAU I

<u>Laboratoires</u>	<u>Étalons Nos</u>	<u>Arrivée BIPM</u>	<u>Départ BIPM</u>	<u>Mode de transport</u>
P.T.B. (Allemagne zone Ouest)	1106820 1106822	10 oct 1960	21 mars 1961	aller et retour par la route; accompagnés.
N.B.S. (États-Unis d'Amérique)	72 73	22 juil 1960	2 juin 1961	aller et retour par avion; accompagnés.
N.S.L. (Australie)	720 41695 41696	19 oct 1960	29 mars 1961	aller et retour par avion, via Teddington; non accompagnés.
N.R.C. (Canada)	498850 498851 1029332 1029339	19 oct 1960	10 avr 1961	aller et retour par avion; non accompagnés.
L.C.I.E. (France)	3961 638719	8 nov 1960	15 mars 1961	aller et retour par la route; accompagnés.
I.E.N. (Italie)	755522 1527396	26 sept 1960	22 mars 1961	aller et retour par train; non accompagnés.
E.T.L. (Japon)	5796 31002 34054	12 oct 1960	7 mars 1961	aller et retour par avion; non accompagnés.
N.P.L. (Royaume-Uni)	713 716	3 oct 1960	14 mars 1961	aller et retour par avion; accompagnés.
I.M.M. (U.R.S.S.)	11 13 922 962	2 oct 1960	24 mars 1961	aller et retour par avion; accompagnés.
B.I.P.M.	52 85			

L'énergie dissipée dans l'étalon ( $0,01$  W) était évacuée par circulation d'un courant d'huile qui traversait en permanence l'étalon de bas en haut.

SCHEMA DE MESURE. RÉDUCTION DES OBSERVATIONS

Afin de ne pas trop allonger la durée des mesures nous avons divisé les étalons en deux groupes; le premier comprenait un étalon représentatif de chaque laboratoire national (non compris

l'Istituto Elettrotecnico Nazionale qui ne participait aux comparaisons qu'en vue du rattachement de son unité de résistance à la moyenne internationale) et deux étalons du Bureau International; le second était constitué par l'ensemble des autres étalons.

Pour chaque laboratoire, l'étalon choisi pour figurer dans le premier groupe (groupe principal) fut celui que nous considérons

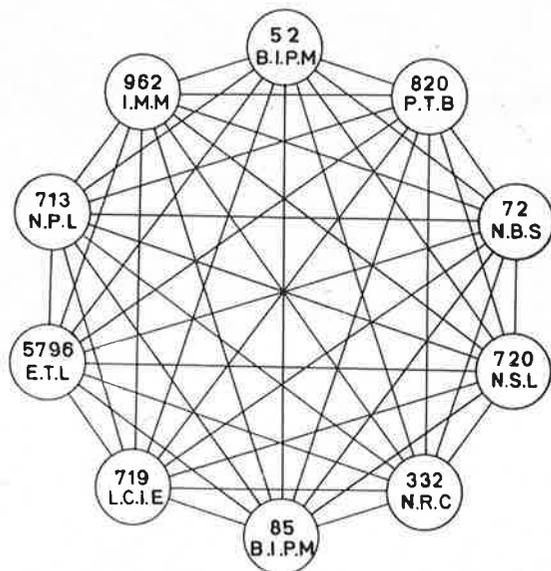


Fig. 1. — Comparaisons en séries fermées des étalons du groupe principal.

comme le plus stable ou celui dont le coefficient de température était le plus faible.

Les dix étalons du groupe principal ont été comparés entre eux, deux à deux, dans toutes les combinaisons possibles (fig. 1). Les 45 séries « aller » ont été effectuées du 28 novembre au 12 décembre 1960 à une température moyenne de 19,943°C; les 45 séries « retour » ont été effectuées du 1<sup>er</sup> au 14 février 1961 à une température moyenne de 20,072°C. L'ensemble des résultats, traité par la méthode des moindres carrés, a permis d'évaluer d'abord la valeur à 20°C de chacun des dix étalons en fonction de leur moyenne M puis, par l'intermédiaire des étalons du Bureau

International, en fonction de l'unité de résistance conservée par celui-ci; l'écart quadratique moyen des 45 séries doubles était inférieur à  $0,06 \mu\Omega$ .

Les étalons du second groupe ont été étudiés par petits groupes constitués chacun de tous les étalons voyageurs d'un même laboratoire et d'un étalon d'origine différente faisant partie du groupe

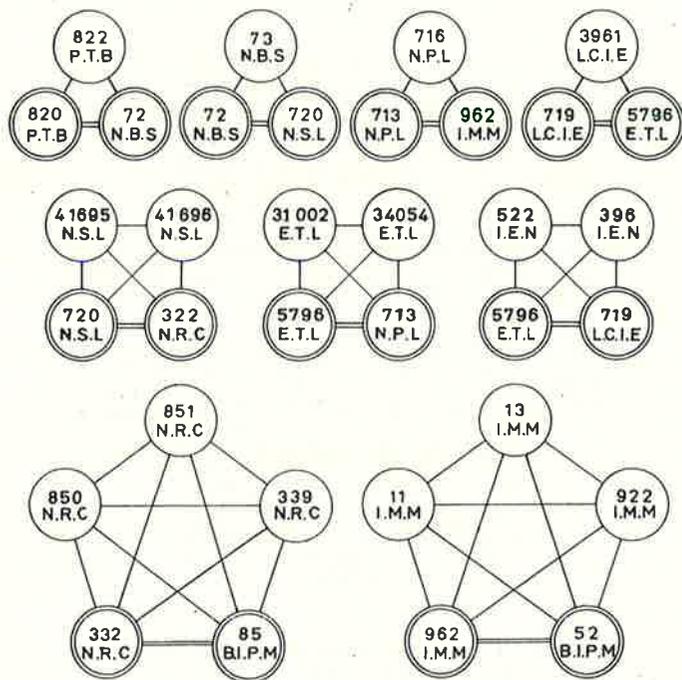


Fig. 2. — Comparaisons des étalons rattachés.

principal (fig. 2). A l'intérieur de chacun de ces petits groupes, les étalons ont été comparés deux à deux dans toutes les combinaisons possibles (les séries « aller » ont été effectuées du 14 au 26 novembre 1960 et les séries « retour » du 15 février au 3 mars 1961); les valeurs des étalons rattachés ont été déduites, après compensation des erreurs de fermeture, des valeurs des deux étalons principaux inclus dans chaque petit groupe.

Les tableaux II à VI donnent le détail des calculs et leurs résultats.

TABLEAU II

VALEURS A 20°C DES ÉTALONS, EN UNITÉ  
DU LABORATOIRE D'ORIGINE, A LA DATE DU 6 JANVIER 1961.

Les valeurs au 6 janvier 1961, date centrale des comparai-  
sons, ont été calculées par interpolation linéaire à partir des ré-  
sistances attribuées aux étalons par les laboratoires nationaux avant  
et après les comparaisons au Bureau International.

<u>Étalons N°s</u>	<u>P.T.B.</u>		<u>Valeurs admises au 6 janvier 1961</u>
	Août-Sept. 1960	Mars-Avril 1961	
1106820	0,999 973 4	0,999 972 9	0,999 973 11 $\Omega_{AO}$
1106822	0,999 975 9	0,999 975 4	0,999 975 61 $\Omega_{AO}$
	<u>0,999 974 65</u>	<u>0,999 974 15</u>	<u>0,999 974 36 <math>\Omega_{AO}</math></u>
	<u>N.B.S.</u>		
	Avril 1960	Juin 1961	
72	1,000 010 13	1,000 010 23	1,000 010 19 $\Omega_{EU}$
73	1,000 012 95	1,000 012 55	1,000 012 69 $\Omega_{EU}$
	<u>1,000 011 54</u>	<u>1,000 011 39</u>	<u>1,000 011 44 <math>\Omega_{EU}</math></u>
Les valeurs à 20°C ont été calculées en appliquant aux valeurs à 25°C portées au Certificat une correction déterminée expérimentalement au Bureau International.			
	<u>N.S.L.</u>		
	Septembre 1960	Septembre 1961	
720	1,000 009 6	1,000 009 6	1,000 009 60 $\Omega_{AU}$
S-41695	0,999 989 5	0,999 989 8	0,999 989 59 $\Omega_{AU}$
S-41696	0,999 991 4	0,999 991 5	0,999 991 43 $\Omega_{AU}$
	<u>0,999 996 83</u>	<u>0,999 996 97</u>	<u>0,999 996 87 <math>\Omega_{AU}</math></u>
	<u>N.R.C.</u>		
	Octobre 1960	Juillet 1961	
498850	0,999 925 0	0,999 924 2	0,999 924 74 $\Omega_C$
498851	0,999 916 8	0,999 916 1	0,999 916 57 $\Omega_C$
1029332	0,999 983 5	0,999 984 4	0,999 983 80 $\Omega_C$
1029339	0,999 987 5	0,999 987 0	0,999 987 33 $\Omega_C$
	<u>0,999 953 20</u>	<u>0,999 952 92</u>	<u>0,999 953 11 <math>\Omega_C</math></u>
	<u>L.C.I.E.</u>		
	Octobre 1960	Mai 1961	
3961	1,000 597 9	1,000 599 4	1,000 598 56 $\Omega_F$
638719	0,999 909 8	0,999 910 1	0,999 909 93 $\Omega_F$
	<u>1,000 253 85</u>	<u>1,000 254 75</u>	<u>1,000 254 25 <math>\Omega_F</math></u>
	<u>E.T.L.</u>		
	Septembre 1960	Avril 1961	
31002	1,000 438 0	1,000 438 3	1,000 438 15 $\Omega_J$
34054	1,000 591 5	1,000 591 8	1,000 591 65 $\Omega_J$
5796	0,999 927 9	0,999 929 4	0,999 928 63 $\Omega_J$
	<u>1,000 319 13</u>	<u>1,000 319 83</u>	<u>1,000 319 48 <math>\Omega_J</math></u>

TABLEAU II (suite)

<u>N.F.L.</u>			
	Octobre 1960	Mai 1961	
713	1,000 049 9	1,000 050 0	1,000 049 94 $\Omega_R$
716	1,000 534 9	1,000 535 0	1,000 534 94
	<u>1,000 292 40</u>	<u>1,000 292 50</u>	<u>1,000 292 44 <math>\Omega_R</math></u>
<u>I.M.M.</u>			
	Septembre 1960	Avril 1961	
11	1,000 450 5	1,000 451 6	1,000 451 05 $\Omega_U$
13	1,000 438 9	1,000 440 2	1,000 439 55
922	1,000 014 8	1,000 014 7	1,000 014 75
962	1,000 029 2	1,000 028 1	1,000 028 65
	<u>1,000 233 35</u>	<u>1,000 233 65</u>	<u>1,000 233 50 <math>\Omega_U</math></u>
<u>B.I.P.M.</u>			
	Avril 1960	Avril 1961	
52	1,000 073 77	1,000 073 75	1,000 073 75 $\Omega_{BIPM}$
85	1,000 015 18	1,000 015 14	1,000 015 15 $\Omega_{BIPM}$
	<u>1,000 044 48</u>	<u>1,000 044 44</u>	<u>1,000 044 45 <math>\Omega_{BIPM}</math></u>

TABLEAU III

VALEURS A 20°C DES ÉTALONS DU GROUPE PRINCIPAL,  
EXPRIMÉES EN FONCTION DE L'UNITÉ DE RÉSISTANCE  
CONSERVÉE PAR LE BUREAU INTERNATIONAL ( $\Omega_{BIPM}$ ).

$$M = \frac{1}{10} \left[ (1106820) + (72) + (720) + (1029332) + (638719) + (5796) + (713) + (962) + (85) + (52) \right]$$

Au 6 janvier 1961

(1106820)	=	M - 19,69 $\mu\Omega$
(72)	=	+ 13,20
(720)	=	+ 9,43
(1029332)	=	- 16,47
(638719)	=	- 95,34
(5796)	=	- 68,13
(713)	=	+ 49,91
(962)	=	+ 31,23
(85)	=	+ 18,68
(52)	=	+ 77,19

Mais (85) = 1,000 015 15  $\Omega_{BIPM}$  d'où M = 0,999 996 47  $\Omega_{BIPM}$   
 (52) = 1,000 073 75  $\Omega_{BIPM}$  M = 0,999 996 56  $\Omega_{BIPM}$

Moyenne = 0,999 996 515  $\Omega_{BIPM}$

et

(1106820)	=	0,999 976 82 $\Omega_{BIPM}$
(72)	=	1,000 009 71
(720)	=	1,000 005 95
(1029332)	=	0,999 980 05
(638719)	=	0,999 901 17
(5796)	=	0,999 928 38
(713)	=	1,000 046 43
(962)	=	1,000 027 74

TABLEAU IV

VALEURS A 20°C DES ÉTALONS RATTACHÉS,  
EN FONCTION DE  $\Omega_{\text{BIPM}}$

Au 6 janvier 1961

				$\Omega_{\text{BIPM}}$
(1106822)	=	(1106820)	+ 2,58 $\mu\Omega$	= 0,999 979 40
	=	(72)	- 30,31	= 0,999 979 40
				<u>0,999 979 40</u>
(73)	=	(72)	+ 2,57 $\mu\Omega$	= 1,000 012 28
	=	(720)	+ 6,34	= 1,000 012 29
				<u>1,000 012 29</u>
(41695)	=	(720)	- 19,62 $\mu\Omega$	= 0,999 986 33
	=	(1029332)	+ 6,19	= 0,999 986 24
				<u>0,999 986 29</u>
(41696)	=	(720)	- 17,97 $\mu\Omega$	= 0,999 987 98
	=	(1029332)	+ 7,85	= 0,999 987 90
				<u>0,999 987 94</u>
(498850)	=	(1029332)	- 59,86 $\mu\Omega$	= 0,999 920 19
	=	(85)	- 95,01	= 0,999 920 14
				<u>0,999 920 17</u>
(498851)	=	(1029332)	- 66,85 $\mu\Omega$	= 0,999 913 20
	=	(85)	- 102,00	= 0,999 913 15
				<u>0,999 913 18</u>
(1029339)	=	(1029332)	+ 2,42 $\mu\Omega$	= 0,999 982 47
	=	(85)	- 32,73	= 0,999 982 42
				<u>0,999 982 45</u>
(3961)	=	(638719)	+ 689,23 $\mu\Omega$	= 1,000 590 40
	=	(5796)	+ 662,02	= 1,000 590 40
				<u>1,000 590 40</u>
(31002)	=	(5796)	+ 509,46 $\mu\Omega$	= 1,000 437 84
	=	(713)	+ 391,31	= 1,000 437 74
				<u>1,000 437 79</u>
(34054)	=	(5796)	+ 663,10 $\mu\Omega$	= 1,000 591 48
	=	(713)	+ 544,95	= 1,000 591 38
				<u>1,000 591 43</u>
(716)	=	(713)	+ 485,27 $\mu\Omega$	= 1,000 531 70
	=	(962)	+ 503,95	= 1,000 531 69
				<u>1,000 531 70</u>
(11)	=	(962)	+ 422,96 $\mu\Omega$	= 1,000 450 70
	=	(52)	+ 376,94	= 1,000 450 69
				<u>1,000 450 70</u>
(13)	=	(962)	+ 411,67 $\mu\Omega$	= 1,000 439 41
	=	(52)	+ 365,65	= 1,000 439 40
				<u>1,000 439 40</u>
(922)	=	(962)	- 14,20 $\mu\Omega$	= 1,000 013 54
	=	(52)	- 60,22	= 1,000 013 53
				<u>1,000 013 53</u>
(755522)	=	(5796)	+ 41,98 $\mu\Omega$	= 0,999 970 36
	=	(638719)	+ 69,30	= 0,999 970 47
				<u>0,999 970 42</u>
(1527396)	=	(5796)	+ 37,66 $\mu\Omega$	= 0,999 966 04
	=	(638719)	+ 64,98	= 0,999 966 15
				<u>0,999 966 10</u>

TABLEAU V

VALEUR DE L'UNITÉ CONSERVÉE PAR CHACUN DES LABORATOIRES,  
EN FONCTION DE  $\Omega_{BIPM}$ .

<u>P.T.B.</u>					
N° 1106820 1106822	0,999 973 11	$\Omega_{AO} = 0,999 976 82$	$\Omega_{BIPM}$	d'où	$\Omega_{AO} = \Omega_{BIPM} + 3,71 \mu\Omega$
	0,999 975 61	$= 0,999 979 40$			$= \Omega_{BIPM} + 3,79$
	0,999 974 36	$\Omega_{AO} = 0,999 978 11$	$\Omega_{BIPM}$		$\Omega_{AO} = \Omega_{BIPM} + 3,75 \mu\Omega$
<u>N.B.S.</u>					
N° 72 73	1,000 010 19	$\Omega_{EU} = 1,000 009 71$	$\Omega_{BIPM}$	d'où	$\Omega_{EU} = \Omega_{BIPM} - 0,48 \mu\Omega$
	012 69	$= 012 29$			$= \Omega_{BIPM} - 0,40$
	1,000 011 44	$\Omega_{EU} = 1,000 011 00$	$\Omega_{BIPM}$		$\Omega_{EU} = \Omega_{BIPM} - 0,44 \mu\Omega$
<u>N.R.C.</u>					
N° 498850 498851 1029332 1029339	0,999 924 74	$\Omega_C = 0,999 920 17$	$\Omega_{BIPM}$	d'où	$\Omega_C = \Omega_{BIPM} - 4,57 \mu\Omega$
	916 57	$= 913 18$			$= \Omega_{BIPM} - 3,39$
	983 80	$= 980 05$			$= \Omega_{BIPM} - 3,75$
	987 33	$= 982 45$			$= \Omega_{BIPM} - 4,88$
	0,999 953 11	$\Omega_C = 0,999 948 96$	$\Omega_{BIPM}$		$\Omega_C = \Omega_{BIPM} - 4,15 \mu\Omega$
<u>N.S.L.</u>					
N° 720 S-41695 S-41696	1,000 009 60	$\Omega_{AU} = 1,000 005 95$	$\Omega_{BIPM}$	d'où	$\Omega_{AU} = \Omega_{BIPM} - 3,65 \mu\Omega$
	0,999 989 59	$= 0,999 986 29$			$= \Omega_{BIPM} - 3,30$
	0,999 991 43	$= 0,999 987 94$			$= \Omega_{BIPM} - 3,49$
	0,999 996 87	$\Omega_{AU} = 0,999 993 39$	$\Omega_{BIPM}$		$\Omega_{AU} = \Omega_{BIPM} - 3,48 \mu\Omega$
<u>L.C.I.E.</u>					
N° 3961 638719	1,000 598 56	$\Omega_F = 1,000 590 40$	$\Omega_{BIPM}$	d'où	$\Omega_F = \Omega_{BIPM} - 8,15 \mu\Omega$
	0,999 909 93	$= 0,999 901 17$			$= \Omega_{BIPM} - 8,76$
	1,000 254 25	$\Omega_F = 1,000 245 79$	$\Omega_{BIPM}$		$\Omega_F = \Omega_{BIPM} - 8,46 \mu\Omega$
<u>E.T.L.</u>					
N° 31002 34054 5796	1,000 438 15	$\Omega_J = 1,000 437 79$	$\Omega_{BIPM}$	d'où	$\Omega_J = \Omega_{BIPM} - 0,36 \mu\Omega$
	591 65	$= 591 43$			$= \Omega_{BIPM} - 0,22$
	0,999 928 63	$= 0,999 928 38$			$= \Omega_{BIPM} - 0,25$
	1,000 319 48	$\Omega_J = 1,000 319 20$	$\Omega_{BIPM}$		$\Omega_J = \Omega_{BIPM} - 0,28 \mu\Omega$
<u>N.P.L.</u>					
N° 713 716	1,000 049 94	$\Omega_R = 1,000 046 43$	$\Omega_{BIPM}$	d'où	$\Omega_R = \Omega_{BIPM} - 3,51 \mu\Omega$
	534 94	$= 531 70$			$= \Omega_{BIPM} - 3,24$
	1,000 292 44	$\Omega_R = 1,000 289 06$	$\Omega_{BIPM}$		$\Omega_R = \Omega_{BIPM} - 3,38 \mu\Omega$
<u>I.M.M.</u>					
N° 11 13 922 962	1,000 451 05	$\Omega_U = 1,000 450 70$	$\Omega_{BIPM}$	d'où	$\Omega_U = \Omega_{BIPM} - 0,35 \mu\Omega$
	439 55	$= 439 40$			$= \Omega_{BIPM} - 0,15$
	014 75	$= 013 53$			$= \Omega_{BIPM} - 1,22$
	028 65	$= 027 74$			$= \Omega_{BIPM} - 0,91$
	1,000 233 50	$\Omega_U = 1,000 232 84$	$\Omega_{BIPM}$		$\Omega_U = \Omega_{BIPM} - 0,66 \mu\Omega$

TABLEAU VI

RÉSULTATS DES COMPARAISONS  
(au 6 janvier 1961)

			Variations depuis 1957
Allemagne	{ [D.A.M.] ..... [P.T.B.] ..... $\Omega_{AO} = \Omega_{BIPM} + 3,75 \mu\Omega$	—	+ 0,45 $\mu\Omega$
Amérique (États-Unis d')	[N.B.S.] ..... $\Omega_{EU} =$	- 0,4	+ 0,6
Australie	[N.S.L.] ..... $\Omega_{AU} =$	- 3,5	—
Canada	[N.R.C.] ..... $\Omega_C =$	- 4,15	+ 0,65
France	[L.C.E.I.] ..... $\Omega_F =$	- 8,5	- 1,1
Japon	[E.T.L.] ..... $\Omega_J =$	- 0,3	+ 0,1
Royaume-Uni	[N.P.L.] ..... $\Omega_R =$	- 3,4	0
U.R.S.S.	[I.M.M.] ..... $\Omega_U =$	- 0,7	- 1,1
		Moy. —	- 0,06 $\mu\Omega$

### CONCLUSION

Les comparaisons ont été effectuées dans d'excellentes conditions et les écarts entre les « unités » de résistance conservées par les divers Laboratoires nationaux et celle du Bureau International sont probablement déterminés à quelques dixièmes de microhm près.

La moyenne des écarts par rapport à  $\Omega_{BIPM}$  est négative; on peut donc admettre, si toutes les unités nationales résultent effectivement de mesures absolues, que l'unité du Bureau International est un peu forte.

Par contre, la moyenne des variations depuis 1957 est presque nulle (0,06  $\mu\Omega$  en 4 ans); la dérive du groupe du Bureau International est, par conséquent, la moyenne des dérives des groupes nationaux, ce qui est satisfaisant.

Toutes les unités nationales, à l'exception de deux d'entre elles, concordent à 5  $\mu\Omega$  près. L'unité de résistance est donc reproduite internationalement avec une uniformité suffisante, au moins actuellement.

(29 décembre 1961)

## ANNEXE 2

Bureau International des Poids et Mesures

### RAPPORT SUR LES COMPARAISONS DES ÉTALONS NATIONAUX DE FORCE ÉLECTROMOTRICE

(décembre 1960-janvier 1961)

Par G. LECLERC

Tous les Laboratoires nationaux engagés dans les comparaisons des étalons de résistance ont également participé à celles des étalons de force électromotrice. Les piles sont parvenues au Bureau International en même temps que les étalons de résistance (*Voir* Annexe 1, Tableau I, p. 18), sauf celles de l'Istituto Elettrotecnico Nazionale (Italie) qui, en dépôt au Laboratoire Central des Industries Électriques, ont été apportées à Sèvres avec les étalons français.

Les comparaisons ont commencé le 14 décembre 1960 après stabilisation des piles conservées à l'abri de la lumière dans un bain d'huile de paraffine maintenu à  $20 \pm 0,2^\circ\text{C}$ , depuis leur arrivée au Bureau International.

Les éléments Weston ont été répartis en neuf groupes :

Groupe	P. T. B.	: N <sup>os</sup> 51202, 51203, 51204, 51206 et 54205.
»	N. B. S.	: N <sup>os</sup> 959, 960, 961, 964, 965 et 966.
»	N. S. L.	: N <sup>os</sup> 3540, 3542, 3724, 3725, 7320 et 7599.
»	N. R. C.	: N <sup>os</sup> 122691, 122697, 122739, 428458, 428462 et 428463.
»	{ L. C. I. E.	: N <sup>os</sup> 7054, 7055 et 7056.
»	{ I. E. N.	: N <sup>os</sup> 7361, 7362, 7363, 7364, 7366 et 7370.
»	E. T. L.	: N <sup>os</sup> 456, 579, A-71, A-78 et A-82.
»	N. P. L.	: N <sup>os</sup> 5821, 5822, 5823, 5824, 5825 et 5826.
»	I. M. M.	: N <sup>os</sup> 5641, 5648, 5649, 5661 et 5699.
»	B. I. P. M.	: N <sup>os</sup> 820, 822, 823, 824, 826, 827, 2902, 2903, 2904 et 2905.

TABLEAU I

VALEURS DES ÉLÉMENTS, EXPRIMÉES EN UNITÉ DU  
LABORATOIRE D'ORIGINE A LA DATE DU 6 JANVIER 1961.

Pour chaque élément, cette valeur est la moyenne des valeurs attribuées par le laboratoire d'origine avant et après les comparaisons au Bureau International.

Nos des éléments	<u>P.T.B.</u>				
	Septembre 1960		Mars-Avril 1961		
					Valeurs moyennes admises
51202	1,018	660 9	1,018	661 3	1,018 661 10 V <sub>AO</sub>
51203		664 1		664 3	664 20
51204		672 0		672 2	672 10
51206+		659 6		661 7	660 65
54205		666 5		667 0	666 75

	<u>N.B.S.</u>				
	Juin-Juill. 1960		Août-Sept. 1961		
950	1,018	625 9	1,018	626 0	1,018 625 95 V <sub>EU</sub>
960		631 7		632 0	631 85
961+		632 7		634 6	633 65
964		627 1		627 2	627 15
965		620 3		621 0	620 65
966		621 2		621 6	621 40

	<u>N.S.L.</u>				
	Septembre 1960		Septembre 1961		
3540	1,018	595 4	1,018	595 5	1,018 595 45 V <sub>AU</sub>
3542		594 4		594 5	594 45
3724		586 4		586 3	586 35
3725		586 0		585 5	585 75
7320+		588 8		590 9	589 85
7599+		572 2		573 3	572 75

	<u>N.R.C.</u>				
	Octobre 1960		Mai 1961		
122 691	1,018	535 4	1,018	537 9	1,018 536 65 V <sub>C</sub>
122 697		549 1		547 4	548 25
122 739		542 0		544 2	543 10
428 458		590 1		591 1	590 60
428 462		591 2		591 2	591 20
428 463		588 0		588 6	588 30

	<u>L.C.I.E.</u>				
	Octobre 1960		Avril 1961		
7054	1,018	642 4	1,018	641 8	1,018 642 10 V <sub>F</sub>
7055		635 7		634 8	635 25
7056		648 7		647 9	648 30

	<u>E.T.L.</u>				
	Octobre 1960		Avril 1961		
456	1,018	656 7	1,018	657 5	1,018 657 10 V <sub>J</sub>
579		650 2		650 9	650 55
A-71		614 0		615 1	614 55
A-78		616 6		618 1	617 35
A-82		615 3		616 2	615 75

TABLEAU I (suite)

<u>N.P.L.</u>					
Septembre 1960			Avril-Mai 1961		
5821	1,018	591 0	1,018	591 1	1,018 591 05 V <sub>R</sub>
5822		590 8		590 7	590 75
5823		590 5		590 5	590 50
5824		610 5		610 0	610 25
5825		608 7		608 2	608 45
5826		611 1		611 2	611 15

<u>I.M.M.</u>					
Septembre 1960			Mai 1961		
5641	1,018	619 9	1,018	619 4	1,018 619 65 V <sub>U</sub>
5648		620 1		620 0	620 05
5649		619 8		619 6	619 70
5661		620 8		620 2	620 50
5699		639 8		639 6	639 70

<u>B.I.P.M.</u>					
Mai-Juin 1960			Avril 1961		
	1,018	613 67	1,018	613 29	1,018 613 48 V <sub>BIPM</sub>

\* Ces éléments, qui ont montré une variation anormale probablement due au transport, n'ont pas, à la demande des laboratoires d'origine, été retenus pour les calculs finaux des comparaisons.

Ces groupes ont été comparés deux à deux dans toutes les combinaisons possibles; les 36 séries « aller » ont été effectuées du 14 au 29 décembre 1960 à une température moyenne de 20,005°C; les 36 séries « retour » ont été effectuées du 11 au 26 janvier 1961 à une température moyenne de 19,994°C. Les mesures ont été faites par un seul observateur en utilisant le potentiomètre spécial et en appliquant la méthode précédemment décrits (*Travaux et Mémoires B. I. P. M.*, 21, 1952, p. 43-65).

Les résultats des mesures, traités par la méthode des moindres carrés, ont permis d'exprimer d'abord la valeur de chaque groupe en fonction de leur moyenne M puis, par l'intermédiaire du groupe du Bureau International, en fonction de l'unité conservée par celui-ci.

On a calculé ensuite la valeur de chaque élément en tenant compte de l'écart qu'il présentait par rapport à la moyenne de son propre groupe.

Les tableaux I à V résument l'ensemble de ces comparaisons.

TABLEAU II

VALEURS DES GROUPES, EXPRIMÉES EN FONCTION DE L'UNITÉ  
CONSERVÉE PAR LE BUREAU INTERNATIONAL ( $V_{BIPM}$ ).

$$M = \frac{1}{9} \left[ \text{PTB} + \text{NBS} + \text{NSL} + \text{NRC} + (\text{LCIE, IEN}) + \text{ETL} \right. \\ \left. + \text{NPL} + \text{IMM} + \text{BIPM} \right]$$

	P.T.B.	=	M + 48,13	$\mu\text{V}$
	N.B.S.	=	+ 7,86	
	N.S.L.	=	- 21,89	
	N.R.C.	=	- 53,97	
	L.C.I.E.+I.E.N.	=	+ 9,31	
	E.T.L.	=	+ 11,27	
	N.P.L.	=	- 11,34	
	I.M.M.	=	+ 14,01	
	B.I.P.M.	=	- 3,38	
Mais	B.I.P.M.	=	1,018 613 48	$V_{BIPM}$
d'où	M	=	1,018 616 86	$V_{BIPM}$
et	P.T.B.	=	1,018 664 99	$V_{BIPM}$
	N.B.S.	=	624 72	
	N.S.L.	=	594 97	
	N.R.C.	=	562 89	
	L.C.I.E.+I.E.N.	=	626 17	
	E.T.L.	=	628 13	
	N.P.L.	=	605 52	
	I.M.M.	=	630 87	

TABLEAU III

VALEURS DES ÉLÉMENTS DE CHAQUE GROUPE,  
EXPRIMÉES EN FONCTION DE V<sub>BIPM</sub>

				<u>P.T.B.</u>	
N°	51 202	=	1,018 660 78	V <sub>BIPM</sub>	
	51 203	=	664 09		
	51 204	=	672 20		
	51 206	=	661 16		
	54 205	=	666 78		
				<u>N.B.S.</u>	
N°	959	=	1,018 623 50	V <sub>BIPM</sub>	
	960	=	629 81		
	961	=	630 81		
	964	=	625 90 <sub>5</sub>		
	965	=	618 79 <sub>5</sub>		
	966	=	619 51 <sub>5</sub>		
				<u>N.S.L.</u>	
N°	3 540	=	1,018 601 52	V <sub>BIPM</sub>	
	3 542	=	600 98		
	3 724	=	592 81 <sub>5</sub>		
	3 725	=	592 21 <sub>5</sub>		
	7 320	=	596 65 <sub>5</sub>		
	7 599	=	585 65 <sub>5</sub>		
				<u>N.R.C.</u>	
N°	428 462	=	1,018 586 46	V <sub>BIPM</sub>	
	428 463	=	583 40 <sub>5</sub>		
	122 691	=	536 44 <sub>5</sub>		
	122 697	=	544 22 <sub>5</sub>		
	428 458	=	539 71 <sub>5</sub>		
			587 17 <sub>5</sub>		
				<u>L.C.I.E. et I.E.N.</u>	
N°	7 054	=	1,018 638 40	V <sub>BIPM</sub>	
	7 055	=	632 50		
	7 056	=	645 10		
	7 361	=	1,018 621 68	V <sub>BIPM</sub>	
	7 362	=	620 86		
	7 363	=	620 44		
	7 364	=	618 87		
	7 366	=	620 50		
	7 370	=	617 22		
				<u>E.T.L.</u>	
N°	456	=	1,018 653 94	V <sub>BIPM</sub>	
	579	=	647 87		
	A-71	=	611 62		
	A-78	=	614 23		
	A-82	=	613 01		
				<u>N.P.L.</u>	
N°	5 821	=	1,018 596 39	V <sub>BIPM</sub>	
	5 822	=	595 91		
	5 823	=	595 89		
	5 824	=	615 34		
	5 825	=	613 49 <sub>5</sub>		
	5 826	=	616 10 <sub>5</sub>		
				<u>I.M.M.</u>	
N°	5 641	=	1,018 626 31	V <sub>BIPM</sub>	
	5 648	=	627 14		
	5 649	=	627 19		
	5 661	=	627 71		
	5 699	=	646 00		

TABLEAU IV

VALEUR DE L'UNITÉ CONSERVÉE PAR CHACUN DES  
LABORATOIRES, EN FONCTION DE  $V_{BIPM}$ .

P.T.B.

N°	51202 = 1,018 661 10	$V_{AO}$	= 1,018 660 78	$V_{BIPM}$	d'où	$V_{AO} = V_{BIPM} - 0,31 \mu V$
	51203 = 664 20		= 664 09			- 0,11
	51204 = 672 10		= 672 20			+ 0,10
	54205 = 666 75		= 666 78			+ 0,03
	<u>1,018 666 04</u>	$V_{AO}$	= <u>1,018 665 96</u>	$V_{BIPM}$		$V_{AO} = V_{BIPM} - 0,07 \mu V$

N.B.S.

N°	959 = 1,018 625 95	$V_{EU}$	= 1,018 623 50	$V_{BIPM}$	d'où	$V_{EU} = V_{BIPM} - 2,41 \mu V$
	960 = 631 85		= 629 81			- 2,00
	964 = 627 15		= 625 90			- 1,22
	965 = 620 65		= 618 79			- 1,82
	966 = 621 40		= 619 51			- 1,85
	<u>1,018 625 40</u>	$V_{EU}$	= <u>1,018 623 50</u>	$V_{BIPM}$		$V_{EU} = V_{BIPM} - 1,86 \mu V$

N.S.L.

N°	3540 = 1,018 595 45	$V_{AU}$	= 1,018 601 52	$V_{BIPM}$	d'où	$V_{AU} = V_{BIPM} + 5,96 \mu V$
	3542 = 594 45		= 600 98			+ 6,41
	3724 = 586 35		= 592 81			+ 6,35
	3725 = 585 75		= 592 21			+ 6,34
	<u>1,018 590 50</u>	$V_{AU}$	= <u>1,018 596 88</u>	$V_{BIPM}$		$V_{AU} = V_{BIPM} + 6,26 \mu V$

N.R.C.

N°	122691 = 1,018 536 65	$V_C$	= 1,018 536 44	$V_{BIPM}$	d'où	$V_C = V_{BIPM} - 0,21 \mu V$
	122697 = 548 25		= 544 22			- 3,95
	122739 = 543 10		= 539 71			- 3,32
	428458 = 590 60		= 587 17			- 3,36
	428462 = 591 20		= 586 46			- 4,65
	428463 = 588 30		= 583 40			- 4,81
	<u>1,018 566 35</u>	$V_C$	= <u>1,018 562 90</u>	$V_{BIPM}$		$V_C = V_{BIPM} - 3,39 \mu V$

L.C.I.E.

N°	7054 = 1,018 642 10	$V_F$	= 1,018 638 40	$V_{BIPM}$	d'où	$V_F = V_{BIPM} - 3,63 \mu V$
	7055 = 635 25		= 632 50			- 2,70
	7056 = 648 30		= 645 10			- 3,14
	<u>1,018 641 88</u>	$V_F$	= <u>1,018 638 67</u>	$V_{BIPM}$		$V_F = V_{BIPM} - 3,16 \mu V$

E.T.L.

N°	456 = 1,018 657 10	$V_J$	= 1,018 653 94	$V_{BIPM}$	d'où	$V_J = V_{BIPM} - 3,10 \mu V$
	579 = 650 55		= 647 87			- 2,65
	A-71 = 614 55		= 611 62			- 2,88
	A-78 = 617 35		= 614 23			- 3,06
	A-82 = 615 75		= 613 01			- 2,69
	<u>1,018 631 06</u>	$V_J$	= <u>1,018 628 13</u>	$V_{BIPM}$		$V_J = V_{BIPM} - 2,88 \mu V$

N.P.L.

N°	5821 = 1,018 591 05	$V_R$	= 1,018 596 39	$V_{BIPM}$	d'où	$V_R = V_{BIPM} + 5,24 \mu V$
	5822 = 590 75		= 595 91			+ 5,07
	5823 = 590 50		= 595 89			+ 5,29
	5824 = 610 25		= 615 34			+ 5,00
	5825 = 608 45		= 613 50			+ 4,96
	5826 = 611 15		= 616 10			+ 4,86
	<u>1,018 600 36</u>	$V_R$	= <u>1,018 605 52</u>	$V_{BIPM}$		$V_R = V_{BIPM} + 5,07 \mu V$

I.M.M.

N°	5641 = 1,018 619 65	$V_U$	= 1,018 626 31	$V_{BIPM}$	d'où	$V_U = V_{BIPM} + 6,54 \mu V$
	5648 = 620 05		= 627 14			+ 6,96
	5649 = 619 70		= 627 19			+ 7,35
	5661 = 620 50		= 627 71			+ 7,08
	5699 = 639 70		= 646 00			+ 6,18
	<u>1,018 623 92</u>	$V_U$	= <u>1,018 630 87</u>	$V_{BIPM}$		$V_U = V_{BIPM} + 6,82 \mu V$

TABLEAU V

RÉSULTATS DES COMPARAISONS  
(au 6 janvier 1961)

Allemagne	{ [D.A.M.] ..... [P.T.B.] ..... }	$V_{AO} = V_{BIPM}$	- 0,1 $\mu V$
Amérique (États-Unis d')	N.B.S. ....	$V_{EU} =$	- 1,9
Australie	[N.S.L.] .....	$V_{AU} =$	+ 6,3
Canada	[N.R.C.] .....	$V_C =$	- 3,4
France	[L.C.I.E.] .....	$V_F =$	- 3,2
Japon	[E.T.L.] .....	$V_J =$	- 2,9
Royaume-Uni	[N.P.L.] .....	$V_R =$	+ 5,1
U.R.S.S.	[I.M.M.] .....	$V_U =$	+ 6,8

CONCLUSION

On constate qu'il existe entre les « unités » de force électromotrice définies par les différents Laboratoires nationaux des écarts qui peuvent atteindre  $10^{-5}$  V. Ces écarts, dus aux incertitudes imposées par les méthodes de mesures absolues pratiquées jusqu'à présent, sont à peu près constants depuis 1955; longtemps considérés comme négligeables eu égard à la précision assez modeste exigée généralement dans les mesures électriques industrielles, ils ne peuvent plus l'être aujourd'hui dans la détermination de certaines nouvelles constantes physiques. Il serait souhaitable qu'en attendant les résultats de nouvelles déterminations absolues, les Laboratoires nationaux acceptent, au moins temporairement, d'ajuster leurs unités sur une même valeur moyenne internationale.

(29 décembre 1961)

## ANNEXE 3

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

# LA CONSERVATION DES UNITÉS ÉLECTRIQUES AU N. B. S.

Par R. D. CUTKOSKY et R. L. DRISCOLL

(Traduction)

### 1. INTRODUCTION

Les unités de résistance et de force électromotrice qui sont ordinairement maintenues au moyen de groupes de référence formés respectivement de résistances de 1 ohm et de piles étalons saturées, sont déduites de mesures rapportées aux étalons prototypes de longueur, de masse et de temps. On sait que les étalons individuels de résistance et de force électromotrice dérivent légèrement par rapport à d'autres étalons de même construction. Ces légères dérives observées font que l'on doit considérer comme possible une dérive de tout le groupe d'étalons à une vitesse inconnue.

La dérive des groupes étalons de référence peut être mesurée en déterminant les unités au moyen des étalons prototypes à des intervalles de temps réguliers. Invariablement, la précision avec laquelle de telles mesures « absolues » peuvent être faites est beaucoup moindre que la précision avec laquelle les résistances ou les piles peuvent être comparées. En conséquence, la valeur réelle de la dérive d'un groupe de référence ne peut pas être mesurée avec toute la précision désirable. Une difficulté supplémentaire vient de ce que la plupart des mesures « absolues » exigent un effort considérable de la part d'une équipe de chercheurs hautement qualifiés.

Dans le but de mesurer la dérive des résistances et des piles de référence, il est avantageux d'employer le même équipement pour toutes les mesures. Par ce moyen, on peut espérer que la plupart des erreurs systématiques aient la même valeur pour toutes

les mesures. La dérive des étalons peut alors être mesurée avec une précision plus grande que celle des mesures absolues. Un avantage supplémentaire est que certains petits termes correctifs peuvent être considérés comme restant constants pendant plusieurs années et n'ont besoin d'être évalués qu'une seule fois.

## 2. MESURES DES RÉSISTANCES

L'équipement utilisé dans une récente évaluation de l'unité de résistance du N. B. S. [1] a été trouvé avantageux pour déceler l'éventuelle dérive des résistances. Cet équipement se compose d'un *cross capacitor* calculable [2], d'un multiplicateur de capacité, d'un pont dont l'équilibre dépend de la fréquence et d'un diviseur de résistance en courant continu.

Le *cross capacitor* est calculable d'après les longueurs de deux calibres de 254 mm (10 inches) au moyen desquels le condensateur est construit. A l'exception de la mesure des calibres, qui est manifestement une opération de routine, l'équipement peut être utilisé pour obtenir en deux ou trois semaines une bonne approximation de la dérive du groupe de résistances.

Le tableau I donne le résultat d'une telle mesure exécutée en août 1961, comparé avec celui de la détermination « absolue » originale de mai et juillet 1960. Plusieurs petites corrections, telles que les coefficients de fréquence des résistances, ont été appliquées directement au résultat d'août 1961, selon le procédé indiqué dans le travail plus complet de 1960. Le résultat de 1961 doit toutefois être considéré comme provisoire, car les calibres n'avaient pas encore été remesurés au moment de la rédaction de cette Note.

Le tableau I montre que la dérive dans le groupe des résistances de  $1 \Omega$  du N. B. S. est inférieure à ce que peut déceler l'équipement de mesure. Il est prévu de répéter ces mesures annuellement jusqu'à ce que de meilleures techniques de mesures soient mises au point.

TABLEAU I

Date	$\Omega_{EU}$
Mai 1960 .....	1,000 0026
Juillet 1960 .....	1,000 0020
Août 1961 .....	1,000 0027

## 3. MESURES DES DIFFÉRENCES DE POTENTIEL

L'unité *volt* est dérivée des mesures absolues de résistance et d'intensité par l'application de la loi d'Ohm. Il a été d'usage de fixer l'unité nationale de courant au moyen d'une balance de

courant, ou électrodynamomètre [3], dont les constantes sont déterminées par la mesure mécanique directe des dimensions de ses circuits. Cette procédure est plutôt compliquée et, lorsqu'il est question de la stabilité des étalons électriques, il apparaît comme plus simple et plus précis de s'assurer de la constance de l'ampère national par l'intermédiaire d'une constante atomique invariable telle que  $\gamma_p$ , le coefficient gyromagnétique du proton. La fréquence de précession,  $\omega$ , des protons dans un champ magnétique B est donnée par  $\omega = \gamma_p B$ . Bender et Driscoll, utilisant une méthode de précession libre [4], ont mesuré  $\gamma_p$  pour des protons dans l'eau et dans un champ de 12 gauss; ils ont trouvé que les fluctuations dans les mesures d'un jour à l'autre étaient généralement inférieures à  $1 \times 10^{-6}$ . Le champ magnétique était produit par le passage d'un courant de 1 A dans un solénoïde à simple couche bobinée dans une rainure rodée sur la surface d'un cylindre en silice fondue. Le pas moyen de ce solénoïde de 1000 tours, d'une longueur de 1 m et d'un rayon de 140 mm, peut être déterminé à tout moment avec une précision d'environ  $1 \times 10^{-6}$ . Les corrections du champ, dues aux variations locales du pas et aux impuretés magnétiques, doivent rester constantes sur une longue période et s'annuler dans les mesures relatives. Avec cet équipement et les accessoires, on pense que la constance de l'ampère national peut être déterminée de temps en temps avec une précision de l'ordre de  $1 \times 10^{-6}$  en se référant au coefficient gyromagnétique du proton.

(1<sup>er</sup> septembre 1961)

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] CUTKOSKY (R. D.), Evaluation of the NBS unit of resistance based on a computable capacitor, *J. Res. N. B. S.*, 65-A, 1961, p. 147.
- [2] THOMPSON (A. M.) et LAMPARD (D. G.), A new theorem in electrostatics and its application to calculable standards of capacitance, *Nature*, 177, 1956, p. 888.
- [3] DRISCOLL (R. L.) et CUTKOSKY (R. D.), Measurement of current with the National Bureau of Standards current balance, *J. Res. N. B. S.*, 60, 1958, p. 297.
- [4] BENDER (P. L.) et DRISCOLL (R. L.), A free precession determination of the proton gyromagnetic ratio, *I. R. É. Trans. on Instr.*, 1-7, 1958, p. 176.

## ANNEXE 4

Electrotechnical Laboratory (Japon)

### DÉTERMINATION ABSOLUE DE L'OHM

(Traduction)

#### I. DÉTERMINATION ABSOLUE DE L'INDUCTANCE

On a déterminé la valeur absolue de l'étalon de self-inductance N° 15, usiné avec précision à l'Electrotechnical Laboratory; ses dimensions sont : diamètre 300 mm, longueur suivant l'axe 300 mm; il comporte au total 300 spires de fil de cuivre de 0,7 mm de diamètre. Le résultat obtenu est

$$L = (18,246\ 369 \pm 0,000\ 021 \pm 0,000\ 053) \text{ mH à } 20^{\circ}\text{C.}$$

Le second terme est l'erreur provenant de la distribution du courant dans la section du fil et le troisième est l'erreur provenant de la mesure des dimensions.

La méthode employée est brièvement décrite ci-après.

#### A. MESURES DES DIMENSIONS

Un comparateur vertical a été construit pour ces mesures.

*a. Mesure du diamètre.* — Le diamètre extérieur de chacune des 300 spires a été comparé à un calibre étalonné de longueur approximativement égale au diamètre extérieur moyen de la bobine. La mesure a été faite suivant les quatre génératrices distantes angulairement de 45 degrés. La différence entre le calibre et chaque diamètre a été déterminée par deux microscopes interférentiels utilisant des franges en lumière blanche. On a estimé à  $\pm 0,3 \mu\text{m}$  l'erreur globale sur la mesure du diamètre.

*b. Mesure du pas.* — On a appliqué la méthode des excédents fractionnaires de l'interférométrie optique, en utilisant une lampe à cadmium naturel. La longueur axiale totale de 300 mm fut

divisée en six intervalles égaux. On estime à  $\pm 0,3 \mu\text{m}$  l'exactitude de la mesure de la longueur totale.

*c. Mesure du diamètre du fil* [1]. — Un fil d'acier de  $0,7 \text{ mm}$  de diamètre, usiné et calibré avec précision, a été utilisé comme étalon et le diamètre de l'échantillon lui a été comparé au moyen d'un microscope interférentiel à franges en lumière blanche. On estime l'exactitude à  $\pm 0,15 \mu\text{m}$ .

## B. CALCUL DE L'INDUCTANCE

*a.* L'inductance correspondant à la « bobine moyenne » a été calculée par les formules de Snow.

*b.* Les corrections provenant des irrégularités de dimensions ont été calculées à l'aide des formules de Iijima, établies à l'E. T. L. [2].

*c.* La correction provenant de la susceptibilité magnétique non nulle du support en verre du bobinage a été calculée par la méthode de Hara mise au point à l'E. T. L. [3].

*d.* On estime que le coefficient de température de l'inductance est  $0,000\ 049\ 8 \text{ mH/deg}$ .

## C. ESTIMATION DE L'ERREUR

*a.* La faiblesse mécanique du fil de cuivre contribue pour la plus grande part aux erreurs dans les mesures des dimensions.

*b.* En ce qui concerne la distribution du courant dans la section du fil, Iijima a montré clairement que la distribution naturelle était théoriquement correcte [4]. Toutefois, aucun renseignement n'a été obtenu sur la distribution de la résistivité dans la section et, par suite, la même ambiguïté qu'auparavant fut conservée pour la détermination de l'erreur due à la distribution du courant.

## II. MESURE ÉLECTRIQUE DE L'INDUCTANCE

L'inductance N° 15 a été mesurée en fonction de l'ohm E. T. L. et de la fréquence étalon JJY en utilisant successivement un pont en courant alternatif de Maxwell-Wien et un pont à commutation de Maxwell.

### A. INSTRUMENTS DE MESURE

L'inductance [5] était placée au centre d'une salle de mesure spéciale où la température était réglée à  $20^\circ\text{C}$ .

a. *Pont alternatif de Maxwell-Wien.* — L'inductance a été mesurée en fonction des valeurs des résistances et d'une capacité du pont. On a utilisé deux types de résistances pour courant alternatif [8]; l'une possède un enroulement de fil nu de manganine sur un cadre, l'autre un enroulement de manganine recouverte de polyéthylène sur une bobine de verre.

On a fait varier la fréquence de mesure de 18 à 450 Hz et la variation de la valeur mesurée avec la fréquence a donné une valeur acceptable pour l'effet de capacité propre de l'inductance, pour les deux types de résistances.

Après une analyse du circuit [6], [7], les effets du facteur résiduel de l'élément du pont et des dispositifs de connexion ont été rendus aussi faibles que possible. Une correction était nécessaire seulement pour l'effet de capacité de l'inductance et des fils de connexion à la capacité aux fréquences supérieures.

b. *Pont de Maxwell à commutation.* — Dans ce pont, la capacité a été mesurée par rapport à une fréquence et à une résistance.

Pour le commutateur de ce pont qui charge et décharge le condensateur, on a utilisé un relais téléphonique modifié à contacts vibrants. Une fréquence de commande de 500 ou 250 Hz était obtenue à partir d'un oscillateur étalonné avec la fréquence étalon. Les résistances étaient des résistances étalons à courant continu de 10, 100, 4 000 et 40 000  $\Omega$ . La valeur de la résistance à la position d'équilibre était déterminée par une autre résistance étalon placée dans le bras du condensateur.

Les résistances du galvanomètre et de la batterie de 48 V étaient mesurées par un autre pont.

On vérifiait expérimentalement que le fonctionnement du commutateur chargeait ou déchargeait complètement le condensateur; on contrôlait de même la précision de l'indication de la valeur moyenne du courant dans le galvanomètre.

Pour diverses combinaisons des résistances et des fréquences de commande, les valeurs mesurées différaient au plus de quelques  $10^{-6}$ .

## B. RÉSULTATS DES MESURES

Les résultats des mesures de l'inductance se groupaient au voisinage de deux valeurs différentes, ce qui semblait dû à l'utilisation des deux types de résistances dans le pont alternatif de Maxwell.

Moyennant certaines suppositions, ces deux valeurs montraient quelque tendance à se déplacer vers des valeurs plus rapprochées, et la valeur exacte semblait être comprise entre ces deux valeurs. On a ainsi obtenu le résultat suivant :

$$L_m/L_{cal} = 1 + 10 \times 10^{-6} \pm 30 \times 10^{-6},$$

où  $L_m$  est la valeur mesurée électriquement en fonction de l'ohm E. T. L. et du temps;  $L_{cal}$  est la valeur calculée d'après les dimensions.

On en déduit la relation suivante :

$$R_{ETL}/R_{abs} = 1 - 10 \times 10^{-6} \pm 30 \times 10^{-6},$$

où  $R_{ETL}$  est l'unité de résistance en usage à l'E. T. L. et  $R_{abs}$  est la valeur de la résistance déterminée par cette mesure.

La plus grande partie de l'erreur est l'erreur systématique entre les deux valeurs, tandis que l'erreur accidentelle autour de chacune de ces valeurs est de l'ordre de  $10 \times 10^{-6}$  ou moins.

(23 août 1961)

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] HARA, SUZUKI et HOSHINO, *Bull. Electrotech. Lab.*, 20, 1956, p. 427.
- [2] IJIMA, *Ibid.*, 17, 1953, p. 434.
- [3] HARA, *Ibid.*, 17, 1953, p. 641.
- [4] IJIMA, *Ibid.*, 21, 1957, p. 755.
- [5] KANNO, *Ibid.*, 21, n° 12, 1957, p. 934-947.
- [6] KANNO, *Ibid.*, 21, n° 12, 1957.
- [7] KANNO, *Ibid.*, 22, n° 2, 1958, p. 140-148.
- [8] KANNO, *Ibid.*, 22, n° 6, 1958, p. 452-460.

ANNEXE 5

Deutsches Amt für Messwesen (Allemagne)

---

RÉALISATION D'UNE BALANCE DE COURANT

Par D. BENDER et W. SCHLESOK

(Traduction)

---

Pour la détermination absolue de l'ampère suivant sa définition, on a construit une nouvelle balance de courant, car il n'est plus possible de disposer de celle de l'ancienne P. T. R. Pour cela, on a étudié la littérature sur les méthodes et les dispositifs de mesure dans d'autres Instituts. Ultérieurement, on a envisagé de remplacer la mesure mécanique des dimensions des bobines par la mesure de leur inductance par rapport à un étalon d'inductance connu en valeur absolue. Les calculs ont montré, en effet, que pour des bobines cylindriques à plusieurs couches d'enroulement, la mesure de l'inductance est possible avec une précision suffisante; les mesures pour différentes positions relatives des bobines supposent cependant une uniformité d'enroulement qui doit être contrôlée mécaniquement comme pour la méthode utilisée jusqu'à présent. Par comparaison des erreurs qui apparaissent pour la balance de courant à bobines plates avec enroulement en spirale (selon Rayleigh) aux erreurs pour des bobines cylindriques à une couche, on a choisi pour la balance de courant du D. A. M. des bobines cylindriques (malgré la plus grande précision exigée pour la détermination des dimensions de la bobine), d'autant plus que pour la détermination absolue de l'ohm il existe un dispositif de mesure du diamètre et de la longueur des bobines avec une incertitude de  $1 \times 10^{-6}$  environ.

Pour déterminer les dimensions les plus favorables des bobines, on a tracé les courbes donnant la force électromagnétique entre les bobines coaxiales suivant trois bobines et suivant la position relative des bobines. De ces courbes, on peut tirer entre autres que la force augmente quand le rapport des rayons des bobines approche de la valeur 1. La force croît et tend vers une valeur

limite avec l'allongement de la plus petite des bobines (mobile); en même temps, le maximum de la courbe  $F(z)$  (variation de la force suivant le déplacement axial de la bobine mobile) s'aplatit. Comme on désire obtenir pour un courant donné la force la plus grande possible pour la position moyenne de la bobine mobile, ainsi que la variation de force la plus faible possible lors de son déplacement axial, on a choisi pour les bobines, compte tenu des exigences de construction, les caractéristiques suivantes :

Bobine	Longueur	Rayon	Nombre de spires
fixe.....	440 mm	135 mm	450
mobile.....	100	100	125

Pour le corps des bobines, on a construit des tubes en quartz (Vitreosil) bien polis d'environ 15 et 6 mm d'épaisseur de paroi. Le fil en cuivre exempt de fer, de 0,8 et 0,6 mm de diamètre, doit être enroulé à partir d'une bobine auxiliaire sur le corps des bobines monté sur un tour à fileter, sous une tension de 20 à 40 N. Pour l'obtention d'une tension constante déterminée on se sert d'un moteur triphasé qui fournit un couple jusqu'à 5 Nm sans échauffement anormal. Les intervalles entre les spires ont pu être rendus aussi égaux que possible par contrôle avec un « peigne » durant l'enroulement, comme pour la détermination absolue de l'ohm effectuée avant la guerre par Zickner, Göns et Blechschmidt.

Les extrémités du fil sont fixées dans des alésages dans le corps en quartz. L'alimentation en courant se fait sur des lames de laiton en des points de l'enroulement qui sont situés exactement sur une ligne parallèle à l'axe des bobines; la bobine fixe possède une connexion au point milieu de son enroulement. Les bobines sont placées au-dessous de la balance dans une cage séparée en duralumin, à fenêtres démontables (*fig. 1*). La bobine fixe est posée sur un plateau circulaire en aluminium muni de vis calantes. A l'aide de niveaux placés sur le plateau, on peut rendre vertical l'axe de la bobine à mieux que 1'. La bobine mobile est suspendue à un support léger à trois bras; elle est également placée dans la position correcte au moyen de vis calantes et niveaux. L'alimentation en courant de la bobine mobile se fait par deux rubans d'argent de 30 cm de long et 10  $\mu$ m d'épaisseur. Le réglage des bobines verticalement et horizontalement l'une par rapport à l'autre est contrôlé par pesée, lors du passage d'un courant (détermination du maximum et du minimum de la force pour la position moyenne de la bobine mobile). Pour éviter l'ouverture de la cage des bobines entre les pesées, la bobine fixe est montée de telle sorte que son réglage puisse être fait de l'exté-

rieur à mieux que  $10\ \mu\text{m}$ . Le déplacement en hauteur se fait par un engrenage à vis sans fin logé dans le socle en béton de la balance et le déplacement latéral par une vis de réglage micro-

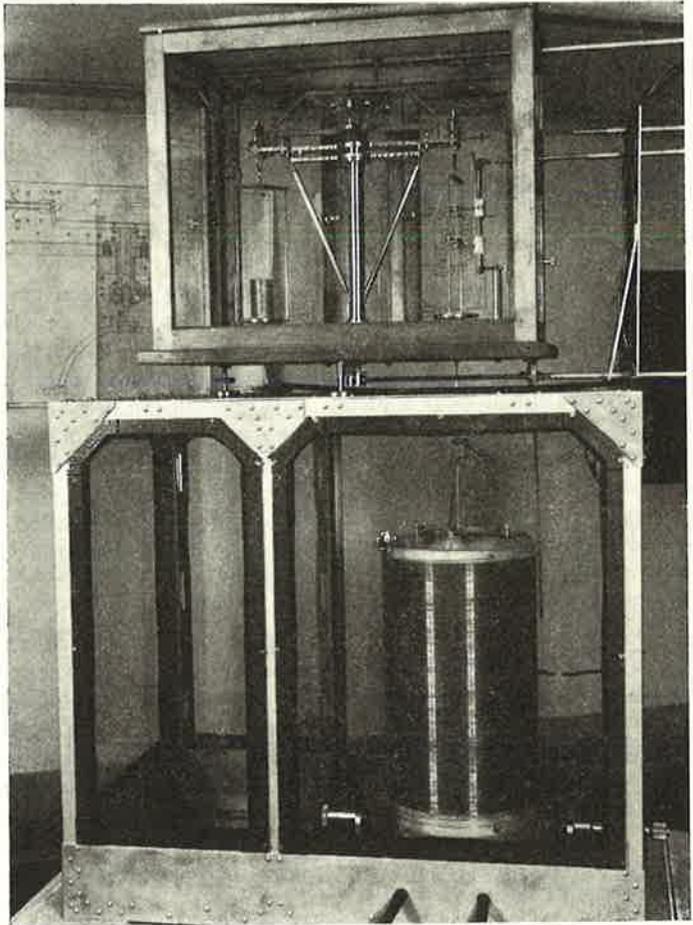


Fig. 1. — Vue générale de la balance de courant.

métrique. A l'intérieur des bobines se trouve un dispositif de refroidissement constitué par un serpentin à écoulement d'eau. Tous les éléments ont été examinés au point de vue susceptibilité magnétique.

Comme balance on doit employer une balance spéciale Rueprecht qui ne sera fournie qu'en 1963. Les essais sont donc faits au D. A. M.

avec une balance du bureau régional de Suhl in Ilmenau, balance qui possède déjà tous les arrangements particuliers requis (*fig. 1*). En dehors des dispositifs d'arrêt on peut, par commande à distance, poser ou déposer de petites charges d'aluminium en même temps qu'on commute le courant dans la bobine mobile. Pour les réglages plus fins, on déplace au moyen d'une fourchette une masse sur une tige filetée dans le prolongement du fléau. Pour la détermination de la sensibilité, on peut déposer un cavalier également par commande à distance. Une butée en forme de piston, constituant un frein à air et servant à limiter le déséquilibre de la balance, empêche toute détérioration en cas de

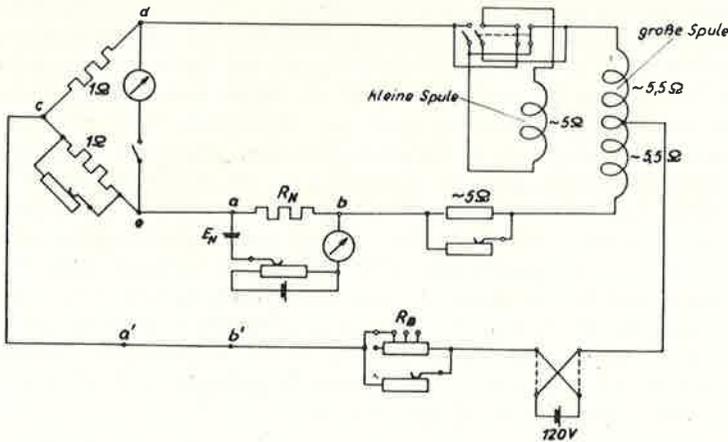


Fig. 2. — Circuit électrique de la balance de courant.

fausse manœuvre dans les commutations électriques. Par l'intermédiaire d'un miroir vertical placé sur le fléau de la balance, on obtient sur une échelle distante de 3 m l'image d'un repère lumineux, qui doit être remplacé plus tard par un dispositif enregistreur. La sensibilité de la balance utilisée pour le moment est seulement de 1 mm/1  $\mu$ N, en regard de la valeur recherchée de 1 mm/0,2  $\mu$ N correspondant à une précision relative sur la force de  $1 \times 10^{-6}$  environ; en outre, l'infidélité, c'est-à-dire la variation de position du point moyen des oscillations sans arrêt de la balance, entraîne une erreur de  $3 \times 10^{-7}$  N sur la mesure de la force, alors que cette erreur ne devrait pas dépasser  $5 \times 10^{-8}$  N.

Le circuit électrique (*fig. 2*) comporte une batterie de 120 V, 200 Ah et une résistance  $R_B$  pour le réglage du courant total; un montage en pont permet d'avoir dans les deux bras des courants dans le rapport 1/1. L'égalisation de la résistance ce

à la valeur de la résistance  $cd$  s'effectue au moyen d'un bras auxiliaire (non indiqué). La mesure du courant dans un bras (intensité de 0,3 à 1,5 A exprimée en unité du D. A. M. représentée par les étalons fondamentaux de résistance et de force électromotrice), résulte de la comparaison de la chute de tension aux bornes d'une résistance étalon  $R_N$  (ou d'une combinaison de deux résistances étalons) à la force électromotrice d'une pile étalon  $E_N$ . Les petites différences de tension sont mesurées à l'aide d'un compensateur Diesselhorst. L'ajustage du courant dans un bras peut aussi être effectué par la mesure du courant total en introduisant  $R_N$  entre  $a'$  et  $b'$ .

C'est par l'expérience que la reproductibilité des pesées pour différentes intensités de courant devra être examinée. Les résultats montrent qu'en employant le dispositif de refroidissement, l'infidélité de la balance provisoire avec des bobines parcourues par un courant de 0,3 à 1,2 A, est du même ordre de grandeur que lorsque les bobines ne sont pas alimentées. Sans refroidissement, l'infidélité de la balance était plus grande et dépendait fortement de l'intensité de courant, avec un minimum pour 1 A environ. Les valeurs de la force trouvées avec la balance provisoire ( $3 \times 10^{-2}$  N environ pour 1 A) ne sont reproductibles qu'à environ  $2 \times 10^{-5}$  seulement. L'emploi de la balance définitive devrait toutefois améliorer la reproductibilité, de telle sorte que l'incertitude de mesure ne dépasse pas  $1 \times 10^{-5}$  pour la détermination absolue de l'ampère. Des études convenables doivent être faites à partir de 1963, lorsque la balance et le dispositif de mesure des bobines seront achevés.

(Octobre 1961)

## ANNEXE 6

Electrotechnical Laboratory (Japon)

---

### RÉCENTS PROGRÈS DES RECHERCHES SUR LES MATÉRIAUX POUR RÉSISTANCES ÉLECTRIQUES (1)

(Traduction)

---

Les matériaux pour résistances étalons, tels que les alliages de la série Cu-Mn, de la série Ag-Mn et les alliages à base d'Au, ont été systématiquement étudiés. Une partie de ces recherches, à savoir celles sur la manganine et les alliages Cu-Mn additionnés de Si, Sn ou Ge, a déjà été présentée au Comité Consultatif d'Électricité en 1957 (*Procès-Verbaux C. I. P. M.*, 26-B, p. E 94). Ce rapport est le second qui concerne ces recherches.

#### ALLIAGES DE LA SÉRIE Ag-Mn

On a étudié les effets de la teneur en Mn (6 à 22 % en poids) sur les propriétés électriques des alliages binaires Ag-Mn. On peut obtenir un faible coefficient de température entre 8 et 10 % de Mn par un recuit à haute température (au-dessus de 400°C) et la courbe résistance-température est plus linéaire que celle des alliages de la série Cu-Mn; mais la résistivité est plus faible et la force électromotrice thermoélectrique par rapport au cuivre est supérieure à 2,5  $\mu\text{V}/\text{deg}$ . La stabilité de la résistance des alliages Ag-Mn est inférieure à celle des alliages de la série Cu-Mn, et pour les teneurs élevées en Mn on observe généralement un accroissement de résistance.

On a alors étudié les effets de l'addition de Pd, Pt, Ge ou Sn aux alliages Ag-Mn. Parmi ces éléments, l'addition de Sn est le plus efficace et fait décroître le coefficient de température et la force électromotrice thermoélectrique. En ajustant les teneurs en Mn et Sn, on peut obtenir un coefficient de température nul.

---

(1) Le rapport détaillé sera publié dans *Researches of the Electrotechnical Laboratory*.

Le tableau I indique les compositions les plus avantageuses et les propriétés électriques pour un recuit de 1 h à 550°C. L'alliage contenant 1 à 1,5 % de Sn est recommandé quand la stabilité est désirée.

TABLEAU I  
*Compositions et propriétés électriques d'alliages Ag-Mn-Sn*

Composition (%)			Résistivité ( $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ )	Coefficient de température		f. é. m. thermoélectrique par rapport au cuivre ( $\mu\text{V}/\text{deg}$ )
Mn	Sn	Ag		$\alpha_{20}$ ( $10^{-6}/\text{deg}$ )	$\beta$ ( $10^{-6}/\text{deg}^2$ )	
7	1-1,5	complément	28	$\pm 1$	$\pm 0,1$	1,5-1,6
7,5	7,5	»	53	$\pm 1$	$\pm 0,1$	0

Les variations de résistance des alliages Ag-Mn-Sn avec le temps sont plus faibles pour des recuits de courte durée à haute température que pour des recuits de longue durée à basse température. Ainsi, on a montré nettement que la stabilité de la résistance et la reproductibilité des propriétés électriques des alliages précédemment mentionnés par d'autres chercheurs sont insuffisantes, parce que ces alliages contiennent davantage de Mn et Sn et sont recuits longtemps à basse température.

La stabilité et la reproductibilité ont donc été améliorées dans les alliages du tableau I, mais la stabilité n'est pas encore suffisante pour les résistances étalons utilisées dans la conservation de l'unité électrique.

#### ALLIAGES A BASE D'Au

Les résistances Au-Cr sont construites avec un alliage Au-Cr contenant 2,35 % de Cr (« charged composition » 2,1 %). Le fil (diamètre 0,9 mm) est recuit à 140-150°C pendant 46 heures après avoir été enroulé sur la bobine de silice fondue portant une rainure en double filet, puis scellé sans contrainte dans l'ampoule de verre contenant de l'argon sous une pression de 1 atm.

On utilise aussi le même fil en Au-Cr comme fil de jonction aux quatre bornes pour éviter l'effet Peltier. Le tableau II indique l'évolution de la résistance d'une bobine. La résistance semble être actuellement très stable, mais malheureusement son coefficient de température  $\alpha_{20}$  est  $11,65 \times 10^{-6}/\text{deg}$ .

Pour les alliages Au-Cr on observe généralement pendant le recuit et pendant la période qui suit la construction un accroissement de la résistance dû à un phénomène métallurgique dans l'alliage, tel que remise en ordre, « G. P. zone », etc., tandis que la tension appliquée au fil fait notablement décroître la résistance.

Il faut donc prendre grand soin de réaliser une construction exempte de contrainte et d'attendre longtemps pour stabiliser la résistance.

TABLEAU II  
Variation de la résistance Au-Cr

Date	Valeur de la résistance (Ω)
Sept. 1953.....	1,001 528 7
Déc. 1954.....	528 5
Juin 1955.....	529 2
Sept. 1955.....	529 2
Déc. 1956.....	530 1
Déc. 1957.....	530 3
Fév. 1960.....	530 6
Déc. 1960.....	530 5

D'autre part, les caractéristiques des alliages Au-Cr contenant 1,9 et 2,3% Cr (« charged composition ») ont été déterminées. La figure 1 indique les relations entre la température de recuit et le coefficient de température.

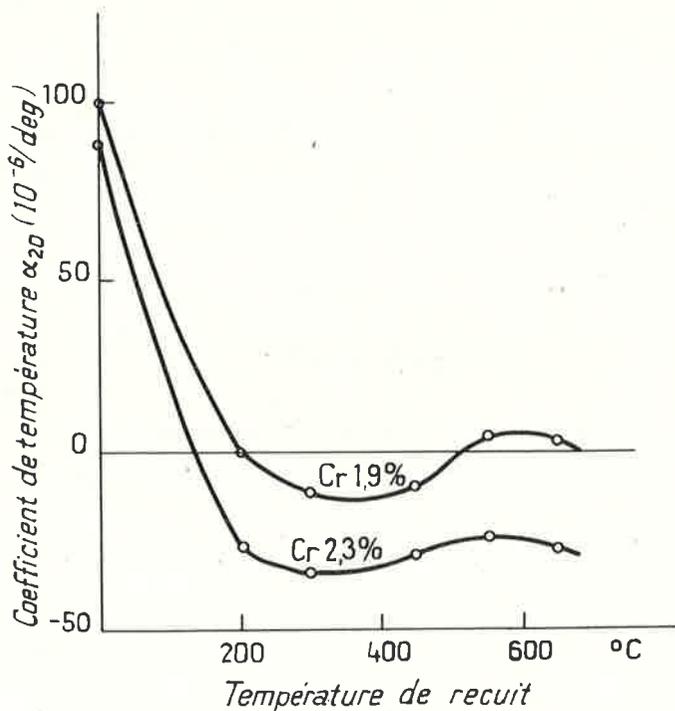


Fig. 1. — Relations entre le coefficient de température et la température de recuit (durée 1 h) pour des alliages Au-Cr.

Les coefficients de température sont minimaux pour des recuits à 300-400°C. Il est donc douteux d'admettre que la résistance atteint son état final stable par un recuit à basse température (150-200°C) généralement adopté dans la construction des résistances. On espère également que la réduction de la teneur en Cr à moins de 1,9 % et une haute température de recuit (300-400°C) amélioreront peut-être la stabilité.

On a alors étudié les additions de Pd, Pt ou Co aux alliages Au-Cr dans le but de réduire la force électromotrice thermoélectrique par rapport au cuivre. L'addition de Pd ou de Co fait décroître le coefficient de température, mais accroît la valeur absolue de la force électromotrice thermoélectrique négative de l'alliage Au-Cr. L'addition de Pt agit faiblement sur les propriétés électriques. Ainsi, le troisième élément réduisant la force électromotrice thermoélectrique par rapport au cuivre de l'alliage Au-Cr (de l'ordre de  $-8 \mu\text{V/deg}$ ) n'est pas encore découvert.

Enfin d'autres alliages à base d'au, tels que Au-Pd, Au-Pt, Au-Co, Au-Mn, Au-Mn-Cr ont été étudiés. Mais leurs caractéristiques sont inférieures à celles des alliages binaires Au-Cr.

#### ALLIAGES DE LA SÉRIE Cu-Mn

On a déjà signalé que l'addition de Ge aux alliages Cu-Mn a remarquablement amélioré leurs propriétés électriques. Plusieurs alliages Cu-Mn-Ge et Cu-Mn-Ni-Ge ont été fondus et leurs caractéristiques mesurées. Le tableau III indique, d'après ces résultats, les compositions les plus avantageuses ainsi que leurs propriétés électriques.

TABLEAU III

*Compositions et propriétés électriques des alliages de la série Cu-Mn contenant du Ge*

	Composition (%)					f. é. m. thermoélectrique par rapport au cuivre ( $\mu\text{V/deg}$ )
	Mn	Ni	Al	Ge	Cu	
I.....	11,5-12	0,2	-	0,45-0,5	complément	
II.....	9,5	0	-	0,7	»	
III.....	9-10	-	2-3	0,3-0,5	»	
	Coefficient de température					
	Résistivité ( $\mu\Omega\text{.cm}$ )	$\alpha_{20}$ ( $10^{-6}/\text{deg}$ )	$\beta$ ( $10^{-6}/\text{deg}^2$ )			
I.....	42-45	$\pm 1$	-0,3 - -0,5			$\pm 0,4$
II.....	37	$\pm 1$	-0,35			0
III.....	42-45	$\pm 1$	-0,3 - -0,4			0,2-0,4

D'autre part, des alliages ternaires Cu-Mn-Al et des alliages Cu-Mn-Al contenant Ni, Si ou Fe ont été étudiés. Dans les alliages ternaires Cu-Mn-Al, un faible coefficient de température peut être obtenu par un recuit à haute température, mais la force électromotrice thermoélectrique par rapport au cuivre est un peu forte (environ  $+ 0,7 \mu\text{V}/\text{deg}$ ). L'addition de fer réduit le coefficient de température et celle de Fe ou de Ni réduit la force électromotrice thermoélectrique. Dans le cas d'addition de Si, le coefficient de température s'accroît notablement pour un recuit à  $300-500^\circ\text{C}$ . On a également trouvé que la prétendue « anomalie thermique » nettement observée dans les alliages de la série Cu-Mn-Al était due principalement à l'existence d'une petite quantité de Fe ou de Si.

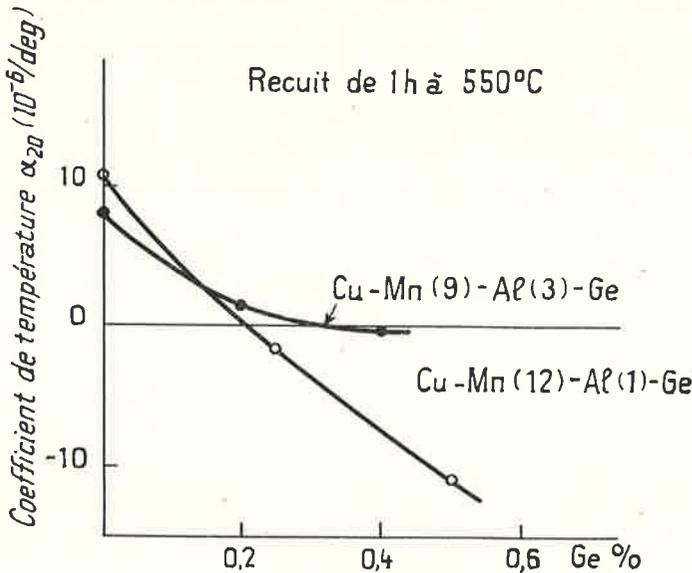


Fig. 2. — Effet d'une addition de Ge sur le coefficient de température d'alliages Cu-Mn-Al.

Les alliages précédemment indiqués contiennent davantage d'Al et ils sont par suite difficiles à travailler mécaniquement. L'addition de Ge aux alliages Cu-Mn-Al et la réduction de la teneur en Al améliorent l'usinabilité et le soudage ainsi que les propriétés électriques et la stabilité de ces alliages, sans nuire à leurs bonnes caractéristiques, telles que résistance à la corrosion, à la chaleur et à l'oxydation. La figure 2 montre l'effet d'une addition de Ge sur le coefficient de température d'alliages Cu-Mn-Al. La compo-

sition la plus avantageuse et ses propriétés électriques sont indiquées dans le tableau III.

Les alliages tels que Cu-Mn-Ge, Cu-Mn-Ni-Ge et Cu-Mn-Al-Ge, ont été réalisés avec succès à l'échelle industrielle.

#### CONCLUSIONS

Les compositions les plus avantageuses de divers alliages pour résistances ont été déterminées comme indiqué ci-dessus, mais il est nécessaire de construire avec ces alliages un lot de résistances et de mesurer celles-ci pendant une longue période dans le but d'estimer la stabilité.

On considère que la manganine, les alliages de la série Cu-Mn contenant du Ge et les alliages Au-Cr conviennent comme matériaux pour les résistances utilisées dans la conservation de l'unité électrique. Dans l'avenir, les recherches sur la série Ni-Cr et sur les alliages de métaux nobles seront nécessaires.

En ce qui concerne l'emploi des résistances en métaux purs pour éprouver la stabilité de la résistance des alliages, on doit particulièrement remarquer que les métaux purs sont mécaniquement faibles et que les chocs thermiques ou mécaniques introduisent facilement des contraintes, qui se relâchent ensuite; en particulier, les dislocations se déplacent dans l'alliage, même à la température ambiante, ce qui produit une variation de résistance.

(23 août 1961)

## ANNEXE 7

Deutsches Amt für Messwesen (Allemagne)

RECHERCHES SUR LES MATÉRIAUX  
POUR RÉISTANCES ÉTALONS

Par D. BENDER et A. KORN

(Traduction)

De nouvelles résistances en alliage or-chrome à 2,05 % Cr ont été fabriquées suivant le procédé déjà éprouvé, tandis que le vieillissement du fil étiré à 200°C environ était interrompu après un changement de résistance déterminé. On arrivait ainsi à des coefficients de température compris entre  $\pm 1 \times 10^{-6}/\text{deg}$ . Le tableau suivant résume les valeurs obtenues ces dernières années pour quelques résistances en or-chrome montées dans un boîtier étanche.

*Valeurs des résistances or-chrome ( $\Omega$  à 20°C)*

N° et année de fabrication...	1 11-14/57	203/57	302/57	401/59
Coefficient de température (en $10^{-6} \text{ deg}^{-1}$ )..	+ 0,2	-1,0	-0,1	+ 0,4
Janv. 1958...	1,000 043 <sub>3</sub>	1,000 041 <sub>8</sub>	1,000 001 <sub>6</sub>	
Sept. 1958...	43 <sub>7</sub>	41 <sub>3</sub>	-	
Mai 1959...	43 <sub>0</sub>	41 <sub>3</sub>	(Janv. 1957 : 04 <sub>6</sub> )	
Août 1959...	43 <sub>1</sub>	41 <sub>0</sub>	01 <sub>6</sub>	1,000 007 <sub>2</sub>
Mars 1960...	44 <sub>0</sub>	41 <sub>3</sub>	01 <sub>8</sub>	06 <sub>8</sub>
Sept. 1960...	43 <sub>2</sub>	40 <sub>3</sub>	01 <sub>2</sub>	07 <sub>7</sub>
Avril 1961..	43 <sub>0</sub>	40 <sub>3</sub>	01 <sub>2</sub>	08 <sub>6</sub>

Les recherches fondamentales sur le comportement des alliages or-chrome seront poursuivies.

On a étudié le comportement au traitement thermique et la constance dans le temps de résistances en alliages « Centanin » (Cu-Ni-Mn), « Nikrothal L » et « Isohm » (Cr-Ni, avec additions), ainsi qu'en « Kanthal DR » (Fe-Cr-Al, avec additions). Les alliages cités sont caractérisés principalement par une résistance spécifique élevée (1,0 à 1,35  $\Omega$  mm<sup>2</sup>/m) et un coefficient de température faible (inférieur à  $\pm 2 \times 10^{-6}$ /deg).

Par un traitement thermique à une température ne dépassant pas 300°C pour le « Kanthal DR » et 400°C pour le « Nikrothal », on observe une modification du coefficient de température dans le sens négatif, et pour une température supérieure une modification dans le sens positif, de telle sorte qu'on peut parvenir à un coefficient de température pratiquement nul. Pour tous les alliages, les changements de résistance dans le temps ne dépassent pas  $\pm 50 \times 10^{-6}$  par an, quelle que soit la température de vieillissement. La fabrication d'un étalon hermétique de résistance élevée, comportant un enroulement en « Isohm » et « Nikrothal », est commencée.

(Septembre 1961)

## ÉTAT DES COMPARAISONS INTERNATIONALES DES ÉTALONS VOYAGEURS DE CAPACITÉ (1)

Conformément à la décision prise par le Comité Consultatif d'Électricité lors de sa 8<sup>e</sup> Session (1957) prévoyant l'organisation de comparaisons internationales d'étalons de capacité, et après enquête du Bureau International auprès des grands Laboratoires nationaux, sept condensateurs au mica, d'une valeur nominale de 0,1  $\mu$ F, ont été rassemblés à Leningrad en mai 1959. Ces condensateurs ont été fournis par les Laboratoires suivants :

Deutsches Amt für Messwesen, Berlin	1
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig	2
Electrotechnical Laboratory, Tokyo	2
Institut de Métrologie D. I. Mendéléév, Leningrad	2

Les premières déterminations ont été effectuées par l'Institut de Métrologie de mai à septembre 1959. Les condensateurs ont été ensuite transportés à Berlin; au cours de ce déplacement l'un des deux étalons russes a été détérioré; cet accident n'a eu toutefois aucune conséquence sérieuse pour la suite des comparaisons, l'Institut de Métrologie ayant remplacé sans retard l'étalon défaillant par un nouvel étalon du même type.

Après les mesures faites par le D. A. M. au cours de l'été 1960, les étalons ont été transportés par la route de Berlin à Braunschweig, où ils ont été étudiés à la P. T. B. de novembre 1960 à juin 1961.

Depuis le 21 juin 1961, les condensateurs sont au Laboratoire Central des Industries Électriques pour être mesurés.

### 1. MESURES A L'INSTITUT DE MÉTROLOGIE D. I. MENDÉLÉEV

I. Krotkov et T. Gouchtchina ont déterminé la capacité et les angles de pertes des condensateurs par la méthode décrite

---

(1) Cette annexe rassemble les rapports présentés au Comité Consultatif par l'I. M. M., le D. A. M. et la P. T. B.

en 1957 <sup>(1)</sup>. Selon cette méthode, les condensateurs ont été étudiés par groupes de quatre. Aux sept condensateurs mentionnés ci-dessus, on en a ajouté deux autres (N<sup>os</sup> 5 et 13), de caractéristiques presque identiques à celles des deux étalons de l'I. M. M. engagés dans les comparaisons circulaires. On a formé ainsi huit groupes. Dans chaque groupe, on a comparé les condensateurs dans différentes combinaisons (*voir* schéma A). L'application de la méthode n'exigeait que quarante comparaisons, mais dans le but de contrôler certains résultats isolés on a fait seize mesures supplémentaires. L'ensemble a été traité par la méthode Legendre-Gauss pour trois fréquences de mesure : 55, 1000 et 5 000 Hz.

A. - Groupement des condensateurs pour les comparaisons

Condensateurs N°	Groupes N°							
	1	2	3	4	5	6	7	8
5	+		+		+			
13	+		+		+			
181*	+			+		+	+	
22	+			+		+		+
580 407		+	+	+				+
580 409		+	+	+				+
4 886		+			+	+	+	
4 888		+			+	+	+	
4 482							+	+

\* Le condensateur N° 181, accidenté au cours de son transport de Leningrad à Berlin, a été remplacé par le condensateur N° 14.

La somme des capacités des quatre condensateurs constituant chaque groupe a été déterminée par rattachement aux étalons d'inductance et de résistance.

Les valeurs des angles de pertes ont été déterminées à partir de l'angle de pertes bien connu d'un des étalons de capacité de l'Institut de Métrologie <sup>(2)</sup>.

Les mesures ont été effectuées à l'aide de deux ponts : pont « d'inductance-capacité » monté suivant le schéma  $\left( L \frac{I}{C} \right) R.R$  et pont à « capacité » monté suivant le schéma  $\left( \frac{C}{C} \right) \frac{R//C}{R//C}$ .

<sup>(1)</sup> КРОТКОВ (I.), Étalon primaire de l'unité de capacité de l'U. R. S. S., *Procès-Verbaux C. I. P. M.*, 26-B, 1958, p. E 72.

<sup>(2)</sup> КРОТКОВ (I.) et ГОУЧТЧИНА (T.), Définition des paramètres des condensateurs par la méthode des comparaisons de décades (en russe), *Trud. Inst. Metrologii*, n° 39 (99), 1960.

Pendant toute la durée des mesures, l'état hygrométrique de l'air est resté compris entre 73 et 83 %.

La tension aux bornes des condensateurs n'a jamais dépassé 5 V et, de ce fait, on n'a jamais remarqué de variation de la capacité mesurée en fonction de la tension appliquée.

Afin de pouvoir réduire toutes les mesures à 20°C, nous avons déterminé les coefficients de température de la capacité et de l'angle de pertes de chacun des condensateurs.

TABLEAU I

N° du condensateur	Coefficient de température	
	de la capacité (%/deg C) × 10 <sup>3</sup>	de l'angle de pertes (rad/deg C) × 10 <sup>5</sup>
22 .....	+4,0	0,6
14 .....	+3,2	0,2
580 407 .....	+1,0	< 1
580 409 .....	+1,3	< 1
4 886 .....	-2,0	0,2
4 888 .....	-2,0	0,3
4 482 .....	-2,0	

Les résultats des mesures figurent dans le tableau II.

## 2. MESURES AU DEUTSCHES AMT FÜR MESSWESEN

Les mesures ont été faites au moyen d'un pont de Schering et Giebe, en comparant par substitution l'étalon à déterminer à un condensateur à air étalon de 0,1 μF, exempt de pertes à la précision des mesures près. Avant et après chaque comparaison, la capacité du condensateur à air était déterminée par rattachement à l'unité de résistance et à l'unité de temps par la méthode de Maxwell-Thomson. Le condensateur à air était chargé et déchargé aux fréquences de 180 et 225 Hz respectivement, au moyen d'un interrupteur rotatif dont la fréquence était stabilisée par un synchronoteur alimenté à la fréquence étalon réglée par quartz.

Les mesures des capacités et des angles de pertes ont été faites aux fréquences 50, 500, 1000 et 5 000 Hz, pour une tension de 5 V mesurée électrostatiquement aux points de connexion des condensateurs. La température de la salle était 20 ± 0,2°C, et l'humidité relative de l'air oscillait entre 60 et 80 % environ.

Les résultats des mesures sont indiqués au tableau II. Ce tableau donne la valeur de la capacité efficace aux fréquences utilisées, l'influence de l'inductance du condensateur étant par conséquent

TABLEAU II  
Premiers résultats des comparaisons internationales des étalons de capacité électrique

Laboratoire d'origine	Étalons Nos	Fréquence de mesure (Hz)	Valeurs des capacités (pF)			Valeurs des tangentes des angles de perte ( $\times 10^4$ )		
			I.M.M. (mai-sept. 1959)	D.A.M. (été 1960)	P.T.B. (nov. 1960- juin 1961)	I.M.M. (mai-sept. 1959)	D.A.M. (été 1960)	P.T.B. (nov. 1960- juin 1961)
D.A.M. (Berlin)	4482	50 <sup>†</sup>	100 066 ± 5	100 066 ± 1	100 064 ± 5	3,3 ± 0,3	2,9 ± 0,3	3,0 ± 0,5
		500	100 046 ± 3	100 046 ± 1	100 068 ± 3	0,9 ± 0,3	1,0 ± 0,3	1,6 ± 0,1
		5 000	100 047 ± 5	100 047 ± 3	100 053 ± 4	1,6 ± 0,3	1,4 ± 0,3	1,2 ± 0,5
P.T.B. (Braunschweig)	4886	50 <sup>†</sup>	99 982 ± 5	99 992 ± 1	100 011 ± 5	2,7 ± 0,3	2,4 ± 0,3	2,4 ± 0,5
		500	99 970 ± 3	99 979 ± 1	99 998 ± 3	0,7 ± 0,3	0,7 ± 0,3	0,8 ± 0,1
		5 000	99 975 ± 5	99 985 ± 3	99 991 ± 4	1,3 ± 0,3	0,6 ± 0,3	0,7 ± 0,1
E.T.L. (Tokyo)	580 407	50 <sup>†</sup>	100 000 ± 5	99 996 ± 1	100 014 ± 5	2,8 ± 0,3	2,5 ± 0,3	2,5 ± 0,5
		500	99 988 ± 3	99 983 ± 1	100 000 ± 3	0,6 ± 0,3	0,7 ± 0,3	0,6 ± 0,1
		5 000	99 991 ± 5	99 987 ± 3	99 994 ± 4	1,2 ± 0,3	0,7 ± 0,3	0,9 ± 0,5
I.M.M. (Leningrad)	22	50 <sup>†</sup>	100 049 ± 5	100 050 ± 1	100 068 ± 5	3,4 ± 0,3	2,8 ± 0,3	3,0 ± 0,5
		500	100 025 ± 3	100 027 ± 1	100 046 ± 2	1,3 ± 0,3	1,4 ± 0,3	1,3 ± 0,1
		5 000	100 020 ± 5	100 021 ± 3	100 029 ± 4	1,8 ± 0,3	1,6 ± 0,3	1,5 ± 0,5
I.M.M. (Leningrad)	14	50 <sup>†</sup>	100 050 ± 5	100 051 ± 1	100 068 ± 5	3,3 ± 0,3	2,7 ± 0,3	3,0 ± 0,5
		500	100 026 ± 3	100 029 ± 1	100 045 ± 2	1,2 ± 0,3	1,4 ± 0,3	1,4 ± 0,1
		5 000	100 021 ± 5	100 024 ± 3	100 031 ± 4	1,7 ± 0,3	1,5 ± 0,3	1,3 ± 0,5
I.M.M. (Leningrad)	22	50 <sup>†</sup>	100 008 ± 5	100 009 ± 1	100 028 ± 5	5,2 ± 0,3	4,8 ± 0,3	5,0 ± 0,5
		500	99 987 ± 3	99 989 ± 1	100 008 ± 3	1,0 ± 0,3	0,9 ± 0,3	1,3 ± 0,1
		5 000	99 991 ± 5	99 990 ± 3	100 004 ± 4	1,4 ± 0,3	1,0 ± 0,3	1,3 ± 0,5
I.M.M. (Leningrad)	22	50 <sup>†</sup>	99 872 ± 5	99 872 ± 1	99 891 ± 5	5,5 ± 0,3	5,2 ± 0,3	5,2 ± 0,5
		500	99 850 ± 3	99 857 ± 1	99 874 ± 3	0,9 ± 0,3	0,9 ± 0,3	1,2 ± 0,1
		5 000	99 856 ± 5	99 861 ± 3	99 870 ± 4	1,9 ± 0,3	1,7 ± 0,3	1,9 ± 0,5

<sup>†</sup> 55 hertz pour l'I.M.M.

comprise. En revanche, on a tenu compte de l'inductance du condensateur à air ayant servi d'étalon de comparaison, de celle de ses lignes de connexion, ainsi que de celle des lignes de connexion du condensateur à mesurer. Cette influence n'exige une correction qu'à la fréquence 5 000 Hz.

Les résultats donnés ont été obtenus à partir de séries de mesures, dont chacune commençait et s'achevait par la mesure absolue de la capacité du condensateur à air, suivant la méthode de Maxwell-Thomson, aux deux fréquences de 180 et 225 Hz.

L'erreur moyenne de la moyenne arithmétique des capacités à chaque fréquence atteint  $\pm 1 \times 10^{-3}$ , avec un écart maximal de  $\pm 3 \times 10^{-3}$  pour une seule mesure.

Par suite de la nécessité de tenir compte, à la fréquence de 5 000 Hz, de l'inductance du condensateur à air, de celle de ses lignes, ainsi que de celle des lignes du condensateur à mesurer, l'incertitude sur les valeurs de capacité données à la fréquence de 5 000 Hz atteint  $\pm 3 \times 10^{-3}$ ; c'est l'incertitude sur la détermination de ces inductances.

L'incertitude sur l'angle de pertes  $\delta$  atteint en valeur absolue  $\pm 3 \times 10^{-3}$ .

### 3. MESURES A LA PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT

Les mesures des capacités et des angles de pertes des sept condensateurs ont été effectuées avec des courants alternatifs sinusoïdaux de fréquences 50, 500, 1000 et 5 000 Hz, sous une tension de 5 V. La température de l'air ambiant était de  $20 \pm 0,2^\circ\text{C}$ , le degré hygrométrique variant entre 40 % et 65 %. On a utilisé un pont du type Schering-Giebe et une méthode de substitution; comme étalon de référence, on s'est servi d'un condensateur à air de valeur nominale  $0,1 \mu\text{F}$ , dont l'angle de pertes aux basses fréquences était inférieur aux erreurs possibles de mesure. La valeur de la capacité du condensateur à air de référence a été déterminée à partir des unités de résistance électrique et de temps, en utilisant une fréquence dérivée des horloges à quartz de la P. T. B., les résistances de mesure étant comparées à l'étalon primaire de résistance de la P. T. B.

La méthode utilisée à cette occasion est basée sur le principe suivant (voir Annexe 9, p. 59) : les éléments d'un pont de Maxwell (un condensateur, une bobine, trois résistances) peuvent être aussi connectés de façon à constituer un pont à résonance-série. Il est possible de régler la valeur des éléments pour qu'il en résulte, à la même fréquence, un équilibre des deux ponts réalisés successivement. Dans ce cas, la capacité du condensateur peut être calculée d'une manière simple, si l'on connaît exactement les

valeurs de la résistance et de la fréquence. La détermination de la capacité du condensateur à air de référence, effectuée avec un courant alternatif de fréquence 1587,302 Hz, à des tensions de 5 ... 10 V, était faite immédiatement avant la comparaison de ce condensateur avec les étalons internationaux, dans les mêmes conditions de température et d'humidité de l'air ambiant.

Les résultats obtenus (tableau II) indiquent les différences des capacités (et les différences des tangentes des angles de pertes) mesurées aux bornes du dispositif de connexion, situées à côté du pont, lorsqu'on débranche l'étalon de capacité de ce dispositif (par exemple, dans le modèle du D. A. M., en tournant l'étalon avec l'écrou prévu à cet effet). L'influence de l'inductance intérieure de l'étalon et du dispositif de connexion sur le résultat de la mesure de la capacité est donc comprise dans ces valeurs. De même, l'influence de la résistance intérieure de l'étalon et du dispositif de connexion est comprise dans le résultat de l'angle de pertes.

Les incertitudes ont été évaluées en tenant compte de toutes les possibilités d'erreur. Les différences entre les résultats obtenus à diverses époques sont très inférieures à ces incertitudes calculées.

## ANNEXE 9

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Allemagne)

---

### DÉTERMINATION FONDAMENTALE DE L'UNITÉ DE CAPACITÉ PAR RATTACHEMENT AUX UNITÉS DE RÉSISTANCE ET DE TEMPS

Par H. E. LINCKH, H. HOYER et F. BRASACK

(Traduction)

---

Pour déterminer l'unité de capacité on peut appliquer une méthode absolue et se servir d'un condensateur calculable. Cependant, compte tenu de la précision limitée que permet d'obtenir cette méthode, on préfère souvent utiliser un procédé indirect et rattacher l'unité de capacité aux unités de résistance et de temps. La valeur d'une très bonne résistance-étalon est constante et connue à quelques  $10^{-6}$  près; celle d'un étalon de fréquence constitué par une horloge à quartz l'est beaucoup mieux encore; on peut donc espérer déterminer l'unité de capacité à environ  $10^{-3}$  près.

Par contre, on ne sait pas réaliser de condensateur calculable de  $0,1 \mu\text{F}$ , valeur de ceux que nous devons mesurer, avec une pareille précision. D'autre part, puisque les étalons de capacité de la meilleure qualité ont une stabilité et une reproductibilité de l'ordre de  $10^{-3}$ , ainsi que l'expérience le prouve, la méthode de rattachement aux unités de résistance et de temps paraît suffisante pour déterminer l'unité de capacité.

Il est désirable que la méthode utilisée soit simple et que les valeurs des termes correctifs soient calculables ou négligeables.

La méthode mise en œuvre à la P. T. B., proposée par Zickner, repose sur l'utilisation des mêmes éléments : trois résistances  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , une bobine d'inductance  $L$  et un condensateur  $C$ , dans

deux montages en pont différents : pont de Maxwell et pont à résonance-série (fig. 1 et 2).

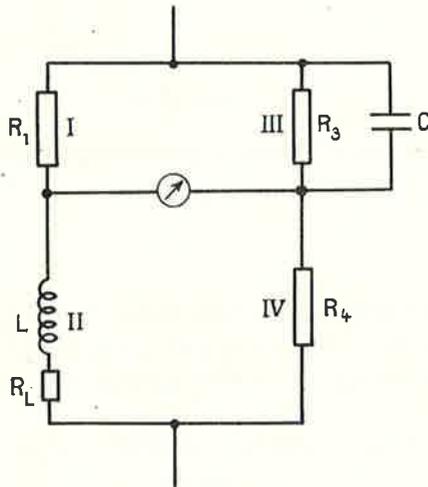


Fig. 1. — Pont de Maxwell.

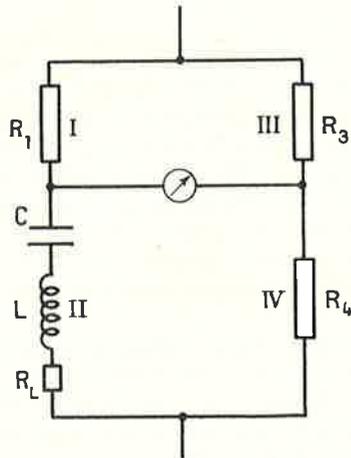


Fig. 2. — Pont à résonance-série.

Comme le montrent les figures 1 et 2, les trois résistances et la bobine occupent exactement les mêmes positions dans l'un et l'autre pont. Seul le condensateur doit être déplacé; dans le pont de Maxwell il est monté dans le bras III en parallèle avec  $R_3$ ,

tandis que dans le pont à résonance il est monté dans le bras II, en série avec la bobine.

Ainsi les éléments restent les mêmes dans chaque pont, de même que la fréquence, la différence de potentiel appliquée, la température, etc. Si l'on choisit alors correctement les valeurs des éléments et celle de la fréquence pour que les deux ponts soient équilibrés pour ces valeurs, on obtient une relation très simple entre  $R$ ,  $L$ ,  $C$  et  $\omega$ ; en effet, le pont de Maxwell fournit l'égalité  $\frac{L}{C} = R_1 R_2$  et le pont à résonance  $LC = \frac{1}{\omega^2}$ ; par élimination de  $L$ , on trouve

$$C = \frac{1}{\omega \sqrt{R_1 R_2}}.$$

Nous avons utilisé des résistances  $R_1$  et  $R_2$  de  $1000 \Omega$  et une fréquence de  $\frac{100\,000,00}{63} = 1\,587,302$  Hz; l'équilibre des deux ponts était alors obtenu pour

$$C = 100,2676 \text{ nF} \quad \text{et} \quad L = 100,2676 \text{ mH}.$$

A la P. T. B. on emploie une bobine et un condensateur qu'on peut ajuster à ces valeurs.

Mais la relation simple admise ci-dessus n'est valable que lorsque les éléments sont des résistances, capacité et inductance pures, c'est-à-dire indépendantes de la fréquence, en amplitude et en phase. En pratique, cette condition n'est jamais réalisée rigoureusement et pour tenir compte de ce défaut un calcul plus important devient nécessaire (*voir* Appendice).

Pour que ce calcul soit clair, il est encore nécessaire de donner quelques indications sur l'installation de mesure.

Chaque pont est pourvu d'un montage auxiliaire de Wagner et mis à la terre en son milieu. Les trois résistances sont blindées, le carter métallique étant mis à la terre; le blindage contient aussi les conducteurs jusque dans le voisinage immédiat des points de jonction du pont. Le carter métallique du condensateur est relié avec l'une des armatures du côté du point de jonction à l'indicateur d'équilibre, point où il est mis au potentiel de la terre lorsque le pont est équilibré. La bobine est libre.

Les capacités de fuite qui apparaissent entre les points de jonction du pont et les carters des résistances sont en parallèle avec le bras auxiliaire de Wagner ou l'appareil indicateur et n'influencent pas l'équilibre du pont principal. Les capacités qui apparaissent entre les deux extrémités des résistances affectent ces résistances; il en est de même des inductances d'enroulement.

On tient compte de ces deux influences par l'introduction de constantes de temps 0 pour les résistances.

Pour la bobine, une capacité en parallèle analogue prend naissance avec le blindage voisin mis à la terre. Cette capacité de fuite dans le montage de Maxwell est sans influence, pour la même raison que les capacités de fuite des résistances. Au contraire, dans le montage en pont à résonance, cette capacité de fuite a une influence sur l'équilibre du pont; si nous la décomposons de façon classique en trois capacités, nous appellerons  $C_5$  celle qui se manifeste entre le point commun à la bobine et au condensateur et le blindage; c'est la seule des trois qui intervienne.

Quant au condensateur, il faut tenir compte du fait que son inductance intérieure  $L_c$  influence un peu les conditions du pont.

Toutes ces données, constantes de temps, capacités de fuite et inductance intérieure, sont déductibles de mesures auxiliaires.

Le calcul plus complet conduit ainsi pour la capacité cherchée au résultat suivant (*voir* Appendice)

$$C' = \frac{C}{1 - \omega^2 L_c C} = \frac{1}{\omega \sqrt{R_1 R_4}} - \frac{C_5}{2}.$$

Pour déterminer ensuite  $C$ , il suffit de connaître les quantités fondamentales  $\omega$ ,  $R_1$  et  $R_4$ , ainsi que les corrections  $C_5$  et  $L_c$ . Les capacités et inductances parasites des résistances, l'inductance de la bobine et sa capacité en parallèle n'interviennent pas.

Dans l'exposé ci-dessus, le principe de mesure proposé par Zickner a été traité dans le but exclusif d'obtenir la capacité  $C$  en fonction de  $\omega$  et des résistances  $R_1$  et  $R_4$ . Mais la méthode est utilisable de façon plus générale, par exemple pour la détermination de  $R$  et  $C$  à l'aide d'une bobine calculable (bobine ohmique).

APPENDICE. — *Détermination fondamentale des capacités; calcul des ponts de mesure*

Les grandeurs qui doivent être introduites dans les calculs relatifs aux ponts de mesure de la P. T. B. pour obtenir la relation ci-dessus, sont données dans la liste suivante; dans la colonne (3) figurent les symboles des grandeurs, dans la colonne (4) les valeurs numériques approximatives déterminées à la P. T. B. Les indications de cette dernière colonne permettent de savoir si les approximations effectuées dans la résolution du calcul sont justifiées.

*Liste des grandeurs intervenant dans les calculs*

Éléments des ponts (1)	Désignation (2)	Symboles (3)	Valeurs (4)
-	Pulsation	$\omega$	$10^4 \text{ s}^{-1}$
Bras I.....	Résistance $R_1$	$R_1$	$10^3 \Omega$
	Constante de temps de la résistance $R_1$	$\theta_1$	$10^{-8} \text{ s}$
Bras III.....	Résistance $R_3$	$R_3$	$10^4 \Omega$
	Constante de temps de la résistance $R_3$	$\theta_3$	$10^{-8} \text{ s}$
Bras IV.....	Résistance $R_4$	$R_4$	$10^3 \Omega$
	Constante de temps de la résistance $R_4$	$\theta_4$	$10^{-8} \text{ s}$
Bobine d'inductance (Bras II).....	Inductance	$L$	$10^{-1} \text{ H}$
	Capacité de la bobine	$C_L$	$2 \text{ pF}$
	Résistance de la bobine	$R_L$	$70 \Omega$
	Résistance additionnelle (pont de Maxwell)	$R_{sm}$	$30 \Omega$
	Résistance additionnelle (pont à résonance)	$R_{rs}$	$30 \Omega$
	$\frac{R_L}{(1 - \omega^2 L C_L)^2}$	$R'_L$	$70 \Omega$
	$\frac{L}{1 - \omega^2 L C_L}$	$L'$	$10^{-1} \text{ H}$
Condensateur (Bras III ou II)...	Capacité	$C$	$10^{-7} \text{ F}$
	Inductance interne	$L_c$	$0,5 \mu\text{H}$
	Déphasage représenté par une résistance pure	$R_c$	$0,1 \Omega$
	$\frac{C}{1 - \omega^2 C L_c}$	$C'$	$10^{-7} \text{ F}$
Bras II du pont à résonance.....	Capacité de fuite	$C_s$	$56 \text{ pF}$

L'impédance de la bobine a pour valeur

$$\frac{R_L + j\omega L}{1 - \omega^2 L C_L + j\omega R_L C_L} = \frac{R_L + j\omega L(1 - \omega^2 L C_L) - j\omega C_L R_L^2}{(1 - \omega^2 L C_L)^2 + (\omega R_L C_L)^2}$$

Dans cette expression, les derniers termes du numérateur et du dénominateur peuvent être négligés, étant inférieurs à  $10^{-6}$  fois les sommes correspondantes [voir les indications de la colonne (4) de la liste]. Par raison d'homogénéité, des simplifications doivent aussi être faites au cours des calculs. Voici l'impédance de la bobine

$$\frac{R_L + j\omega L(1 - \omega^2 L C_L)}{(1 - \omega^2 L C_L)^2} = \frac{R_L}{(1 - \omega^2 L C_L)^2} + \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 L C_L} = R'_L + j\omega L'$$

La résistance  $R_L$  était pour la bobine utilisée d'environ 70  $\Omega$ . Pour l'ajustage, un conducteur bifilaire était disposé en série avec la bobine et réglé de telle sorte que la résistance du bras contenant la bobine atteigne 100  $\Omega$ . L'introduction de cette résistance  $R_z$  est un peu différente d'un pont à l'autre ( $R_{zm}$  ou  $R_{zs}$ ). La différence est de l'ordre de 0,1  $\Omega$ .

L'impédance du condensateur est

$$R_c + j\omega L_c + \frac{1}{j\omega C} = R_c + \frac{1 - \omega^2 CL_c}{j\omega C} = R_c + \frac{1}{j\omega C'},$$

et son inverse

$$\frac{j\omega C'}{1 + j\omega C' R_c} = \frac{j\omega C' + \omega^2 C'^2 R_c}{1 + (\omega C' R_c)^2} \approx j\omega C' + \omega^2 C'^2 R_c.$$

Dans le pont à résonance, les impédances de la bobine et du condensateur sont en série. Elles forment, avec l'impédance de la capacité de fuite  $C_z$ , une étoile d'impédances qui peut se transformer en triangle. Ainsi l'impédance du bras II du pont à résonance a pour valeur

$$(R_{zs} + R'_L + j\omega L') \left( 1 + \frac{C_z}{C'} \right) + R_c + \frac{1}{j\omega C'}.$$

La condition d'équilibre du pont de Maxwell peut s'écrire sous la forme

$$R_{zm} + R'_L + j\omega L' \\ = R_1 R_4 (1 + j\omega \theta_1) (1 + j\omega \theta_4) \left[ \frac{1 - j\omega \theta_3}{R_3} + j\omega C' + \omega^2 C'^2 R_c \right].$$

Il en résulte, après avoir négligé les termes les plus petits,

$$R_{zm} + R'_L + j\omega L' \\ = R_1 R_4 [1 + j\omega (\theta_1 + \theta_4)] \left[ \frac{1}{R_3} + \omega^2 C'^2 R_c + j\omega \left( C' - \frac{\theta_3}{R_3} \right) \right] \\ = R_1 R_4 \left[ \frac{1}{R_3} + \omega^2 C'^2 R_c - \omega^2 C' (\theta_1 + \theta_4) + j\omega \left( C' + \frac{\theta_1 + \theta_4 - \theta_3}{R_3} \right) \right]; \\ R'_L = \frac{R_1 R_4}{R_3} + \omega^2 C' R_1 R_4 [C' R_c - (\theta_1 + \theta_4)] - R_{zm}; \\ L' = R_1 R_4 C' + \frac{R_1 R_4}{R_3} (\theta_1 + \theta_4 - \theta_3).$$

Pour le pont à résonance, l'équilibre s'écrit

$$\frac{R_1 R_4}{R_3} \frac{(1+j\omega\theta_1)(1+j\omega\theta_4)}{1+j\omega\theta_3} = (R_{zs} + R'_L + j\omega L') \left(1 + \frac{C_z}{C'}\right) + R_c + \frac{1}{j\omega C'}$$

$$\frac{R_1 R_4}{R_3} [1 + j\omega(\theta_1 + \theta_4 - \theta_3)]$$

$$= (R_{zs} + R'_L) \left(1 + \frac{C_z}{C'}\right) + R_c + j\omega L' \left(1 + \frac{C_z}{C'}\right) + \frac{1}{j\omega C'}$$

$$R'_L = \frac{1}{1 + \frac{C_z}{C'}} \left[ \frac{R_1 R_4}{R_3} - R_c \right] - R_{zs}$$

$$L' = \frac{1}{1 + \frac{C_z}{C'}} \left[ \frac{1}{\omega^2 C'} + \frac{R_1 R_4}{R_3} (\theta_1 + \theta_4 - \theta_3) \right]$$

$$\approx \frac{1}{\omega^2 (C' + C_z)} + \frac{R_1 R_4}{R_3} (\theta_1 + \theta_4 - \theta_3)$$

Les deux valeurs de  $L'$  conduisent à

$$C'(C' + C_z) = \frac{1}{\omega^2 R_1 R_4} \approx \left(C' + \frac{C_z}{2}\right)^2$$

$$C' = \frac{1}{\omega \sqrt{R_1 R_4}} - \frac{C_z}{2}$$

$$L' = \frac{\sqrt{R_1 R_4}}{\omega} + R_1 R_4 \left[ \frac{\theta_1 + \theta_4 - \theta_3}{R_3} - \frac{C_z}{2} \right]$$

On peut, par approximation, écrire les deux expressions de  $R'_L$  sous la forme

$$R'_L = \frac{R_1 R_4}{R_3} - R_{zm} + R_c - \frac{\theta_1 + \theta_4}{C'}$$

et

$$R'_L = \frac{R_1 R_4}{R_3} - R_{zs} - R_c - \frac{C_z}{C'} \frac{R_1 R_4}{R_3}$$

D'où

$$R'_L = \frac{R_1 R_4}{R_3} - \frac{R_{zm} + R_{zs}}{2} - \frac{1}{2C'} \left( \theta_1 + \theta_4 + C_z \frac{R_1 R_4}{R_3} \right),$$

$$R_c = \frac{R_{zm} - R_{zs}}{2} + \frac{1}{2C'} \left( \theta_1 + \theta_4 - C_z \frac{R_1 R_4}{R_3} \right).$$

En fait, la résistance  $R_z$  est réglée quelque peu différemment dans les deux ponts. Les valeurs  $R_{zm}$  et  $R_{zs}$  diffèrent l'une de l'autre d'un peu moins de  $0,1 \Omega$ . Cette différence est produite par l'influence de la capacité de fuite  $C_z$ , des constantes de temps des résistances et par le facteur de perte du condensateur.

(Août 1961)

## ANNEXE 10

Electrotechnical Laboratory (Japan)

### CONDENSATEURS ÉTALONS POUR LES COMPARAISONS INTERNATIONALES

(Traduction)

Les deux condensateurs présentés pour les comparaisons internationales sont des condensateurs étalons constitués d'un nombre pair de feuilles de mica argenté (*fig. 1*). Pour immobiliser les feuilles et obtenir une bonne stabilité aux chocs et aux vibrations, ainsi que de bonnes caractéristiques électriques, on a adopté l'imprégnation par silicone et résine époxy. La capacité parasite à travers les substances d'imprégnation semble altérer les excellentes caractéristiques de la capacité principale à travers le mica.

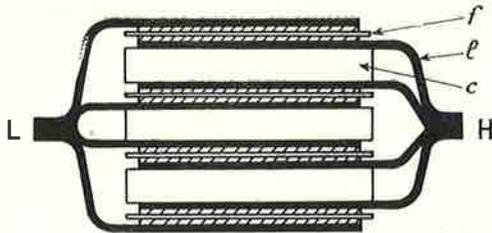


Fig. 1. — Construction du condensateur.  
*f*, feuille de mica argenté; *l*, lame conductrice;  
*c*, cale de mica; L et H, bornes isolées.

La capacité parasite entre les feuilles est diminuée par des cales introduites entre elles. Par cette construction, on a obtenu un coefficient de température d'environ  $10^{-5}$  par degré. Pour réduire la tolérance sur la valeur de la capacité d'un tel condensateur dont la construction avec imprégnation ne permet pas l'ajustage, on a associé un condensateur principal, de capacité légèrement inférieure à la valeur nominale, avec un petit condensateur ajustable.

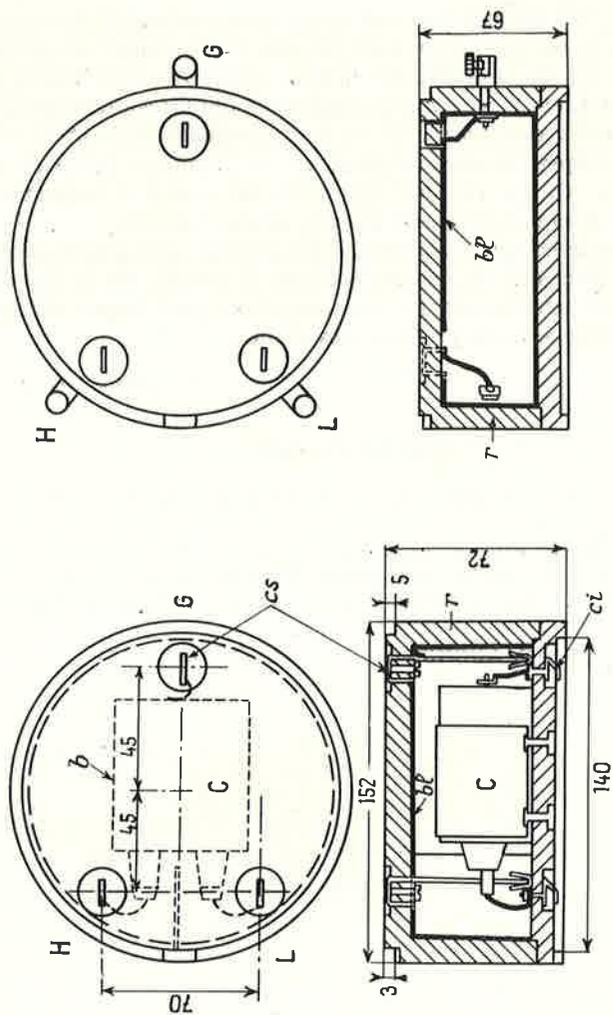


Fig. 2 et 3. — Boîtier et son support.  
H, L, G, bornes; C, condensateur; b, boîte métallique; bl, blindage;  
cs, contact supérieur; ci, contact inférieur; r, résine.

Par cette méthode, on obtient aisément une tolérance inférieure à 0,005 %. Ces condensateurs en deux parties sont hermétiquement scellés dans une boîte métallique avec deux bornes isolées H et L.

Pour que le condensateur soit connecté au dispositif de mesure comme un condensateur à trois bornes, on a réalisé un boîtier de mesure et un support. Le boîtier, muni de trois paires de contacts H, L et G, renferme le condensateur; les contacts H et L sont connectés aux bornes H et L du condensateur et G à la boîte métallique du condensateur et au blindage intérieur du boîtier (*fig. 2*). Le support est muni de contacts semblables, connectés chacun à la borne la plus proche (*fig. 3*).

Après avoir connecté les bornes du support aux points conve- nables du dispositif de mesure, on pose le boîtier sur le support et l'on peut achever ensuite les connexions sans risque d'erreur et sans influence de la présence des mains.

(23 août 1961)

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] KANNO (M.) et KOIZUMI (Y.), *Bull. Electrotechnical Lab.*, 23, n° 2, 1951, p. 145.
- [2] KANNO (M.) et KOIZUMI (Y.), *Ibid.*, 25, n° 1, 1961, p. 37-52.
- [3] OHASHI (T.), KANNO (M.) et KOIZUMI (Y.), *Ibid.*, 25, n° 6, 1961, p. 470.
- [4] ENDO (T.), *J. Inst. Electrical Communication Engrs Japan*, 44, n° 6, 1961.
- [5] KANNO (M.), *Res. Electrotechnical Lab.*, n° 597, avril 1961.

ÉTAT ACTUEL DES ÉTALONS DE CAPACITÉ  
DE FAIBLES VALEURS A L'E. T. L.

(Traduction)

L'Electrotechnical Laboratory dispose maintenant d'un groupe de condensateurs étalons primaires du type ETL s'étendant de 0,001 à 1 pF.

Les capacités des étalons primaires ont été calculées d'après leurs dimensions.

1. *Construction et théorie des étalons primaires.* — Comme le montre schématiquement la figure 1, le condensateur type ETL consiste en une électrode de garde annulaire G, une électrode à haut potentiel H et une électrode à faible potentiel L. Ces deux dernières sont maintenues à très petite distance C de l'électrode de garde G.

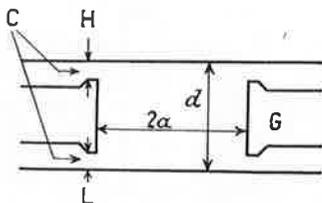


Fig. 1. — Condensateur type ETL.

G, électrode de garde annulaire; H, électrode à haut potentiel;  
L, électrode à bas potentiel.

Pour un condensateur idéalement construit, c'est-à-dire lorsque la distance C tend vers zéro, la valeur de la capacité est calculée en utilisant la formule suivante de Iijima, non encore publiée

$$C_0 = 4\pi\alpha\varepsilon \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{U_{0n} \sin h(U_{0n}d/\alpha)} \quad (\text{unités SI}),$$

- où  $U_{0n}$  = racine positive de  $J_0(x) = 0$ ;  
 $J_0(x)$  = fonction de Bessel de première espèce;  
 $a$  = rayon intérieur de l'anneau de garde G;  
 $d$  = intervalle entre les électrodes actives H et L;  
 $\epsilon$  = constante diélectrique de l'air.

On a construit un certain nombre d'étalons primaires de capacité; le tableau I donne leurs dimensions principales, leur capacité calculée et leur exactitude.

TABLEAU I

Date	Condensateur N°	Valeur nominale (pF)	$2a$ (mm)	$d$ (mm)	Capacité calculée	Exactitude
1958.1...	1	1	40,0047	6,656 9 <sub>3</sub>	0,999 79	$1,1 \times 10^{-4}$
1958.1...	1	0,1	39,9927	24,379 9 <sub>1</sub>	0,099 922	$1,1 \times 10^{-4}$
1959.1...	1	0,01	29,9973	30,775 7 <sub>3</sub>	0,009 999	$0,2 \times 10^{-3}$
1959.1...	1	0,001	29,995 <sub>1</sub>	45,128 3 <sub>0</sub>	0,001 000 0	$0,4 \times 10^{-3}$

2. *Condensateurs étalons variables de faibles valeurs.* — Les petites différences de capacité entre étalons ont été mesurées dans un pont à transformateur, au moyen d'un condensateur de faible valeur continûment variable. La conception de ce condensateur variable (*fig. 2*) permet de réaliser une variation de capacité aussi petite que l'on désire. La capacité est modifiée par une électrode tournante T connectée au blindage; elle couvre une partie ou la totalité de l'ouverture entre les deux électrodes actives  $a$  et  $b$ .

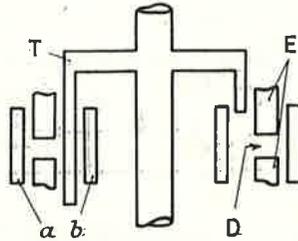


Fig. 2. — Condensateur variable de faible valeur.

T, électrode tournante;  $a$ ,  $b$ , électrodes actives;  
D, intervalle; E, troisième électrode connectée au blindage.

L'avantage de ce type de condensateur est que l'échelle de variation est exactement linéaire et que la valeur maximale de la capacité est ajustable exactement par l'intervalle D. Ce condensateur couvre le domaine 0 à 0,01 pF et son échelle est graduée directement en pF; une division de l'échelle correspond à  $10^{-6}$  pF.

3. *Nouveau condensateur étalon.* — Un nouveau condensateur étalon de  $0,1 \text{ pF}$  a été réalisé afin d'améliorer l'exactitude des étalons de capacité. Bien que l'estimation théorique de l'exactitude soit en cours, on pense que l'incertitude sur la valeur attribuée à cet étalon n'excède pas beaucoup  $10^{-6}$ .

La conception de base, fondée sur une combinaison du théorème de Lampard et du principe de construction du condensateur type ETL, permet pratiquement de calculer la valeur du nouveau condensateur étalon en fonction d'une unique mesure de longueur.

La figure 3 montre schématiquement l'ensemble. Deux paires d'électrodes ( $a$  et  $b$ ,  $c$  et  $d$ ) constituent le *cross capacitor*, tel qu'il est décrit dans le théorème de Lampard.

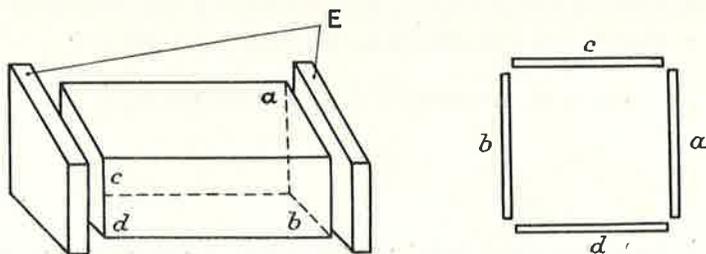


Fig. 3. — Nouveau condensateur étalon.

$a$  et  $b$ ,  $c$  et  $d$ , paires d'électrodes constituant le *cross capacitor*;  
E, troisième électrode connectée au blindage.

Afin d'estimer l'effet d'extrémité du *cross capacitor*, le nouveau condensateur a sa troisième électrode E connectée au blindage et l'effet d'extrémité est calculé en utilisant une autre formule d'Iijima non publiée.

(23 août 1961)

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

DÉTERMINATIONS ABSOLUES  
DU COEFFICIENT GYROMAGNÉTIQUE DU PROTON  
DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE FAIBLE (1)

Par B. M. YANOVSKY et N. V. STODENTSOV

La constante universelle du coefficient gyromagnétique du proton  $\gamma_p$  acquiert actuellement une importance toujours croissante dans la métrologie, vu qu'elle donne la possibilité d'effectuer les mesures absolues de l'intensité du champ magnétique dans toute l'étendue de leur domaine. Aussi sa valeur en unités absolues est-elle nécessaire, de même que la valeur de la longueur d'onde lumineuse. Cela explique le fait que les institutions métrologiques du monde entier effectuèrent des mesures absolues de  $\gamma_p$  au cours des dernières années. Jusqu'à présent, les mesures dans ce domaine ont été effectuées en 1949 par Thomas, Hipple, Driscoll [1] aux États-Unis d'Amérique, en 1957 par Wilhelmy [2] en Allemagne et en 1958 par Driscoll et Bender [3].

D'après ces mesures, on a attribué à  $\gamma_p$  les valeurs suivantes en  $\text{Oe}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  :

$$\gamma_p = (2,675\ 23 \pm 0,000\ 06) \times 10^4 \quad (\text{Thomas et autres}),$$

$$\gamma_p = (2,675\ 49 \pm 0,000\ 08) \times 10^4 \quad (\text{Wilhelmy}),$$

$$\gamma_p = (2,675\ 13 \pm 0,000\ 02) \times 10^4 \quad (\text{Driscoll}).$$

Bien que chaque mesure isolée ait été effectuée avec une erreur de 2 à  $3 \times 10^{-3}$  de la grandeur mesurée, la divergence entre les résultats est de  $10^{-4}$ , c'est-à-dire presque dix fois plus grande.

---

(1) Résumé de l'article en langue russe publié dans *Trud. Inst. Metrologii D. I. Mendeleev* (V. N. I. I. M.), 1961, n° 54 (114), p. 3-36.

C'est pourquoi, pour obtenir les valeurs les plus probables de  $\gamma_\rho$ , il est de rigueur d'effectuer ces mesures sur une plus grande échelle et par des méthodes différentes. La relation qui sert de base pour la détermination de  $\gamma_\rho$  est

$$(1) \quad \omega = 2\pi f = \gamma_\rho H.$$

Donc, pour déterminer  $\gamma_\rho$ , il est nécessaire de mesurer la fréquence  $f$  et l'intensité du champ magnétique  $H$ .

Les mesures de  $f$  avec la précision nécessaire ne posent aucun problème et elles peuvent être effectuées par les moyens techniques actuels. La mesure de l'intensité du champ magnétique en unités absolues présente par contre de grandes difficultés.

En U. R. S. S., l'Institut de Métrologie D. I. Mendéléev (V. N. I. I. M.) à Leningrad et l'Institut des Mesures et Instruments de Mesure (K. G. I. M. I. P.) à Kharkov, effectuent les travaux sur la détermination en valeur absolue de  $\gamma_\rho$  en se servant de deux méthodes différentes. On applique au V. N. I. I. M. la méthode d'induction nucléaire libre [5], tandis qu'au K. G. I. M. I. P. on utilise la méthode de Thomas, Hipple et Driscoll [1].

Les résultats des premières mesures de  $\gamma_\rho$  au V. N. I. I. M. ont été publiés en 1959 [4]. D'après ces résultats,

$$\gamma_\rho = (2,675\ 20 \pm 0,000\ 12) \times 10^4 \text{ Oe}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Le présent travail est la suite directe de ces premières mesures. Il donne la description plus complète des méthodes de mesure ainsi que les calculs théoriques des limites des erreurs systématiques et accidentelles.

#### SCHÉMA DE LA MESURE PAR LA MÉTHODE D'INDUCTION NUCLÉAIRE LIBRE

Le schéma de la mesure de  $H$  par la méthode d'induction nucléaire libre consiste principalement en trois éléments : capteur sous forme d'une bobine, avec une ampoule remplie d'eau et entourée d'une bobine aimantée, amplificateur et fréquencemètre.

La construction du fréquencemètre peut être variée pourvu qu'elle permette de déterminer une fréquence de l'ordre de plusieurs kilohertz avec une erreur qui ne dépasse pas 0,001 %.

Un des dispositifs pratiquement employés est basé sur le mélange de la fréquence à mesurer avec celle du générateur de référence et sur l'observation de la différence des fréquences avec un oscillographe à boucle. Dans ce cas, la tension de la fréquence d'un signal nucléaire  $f$  (après amplification) est envoyée au mélangeur en même temps que la tension du générateur de référence à la fréquence  $f_0$ .

Du mélangeur, les variations de fréquence  $f' = f - f_0$  sont envoyées à l'oscillographe à boucle qui les enregistre sous forme d'une sinusoïde atténuée. Dans ce cas, la fréquence à mesurer  $f$  est déterminée par l'équation

$$(2) \quad f = f_0 \pm f'.$$

La fréquence du générateur de référence doit être déterminée avec une précision d'au moins  $10^{-6}$ , ce qui est obtenu par la vérification du générateur d'après la fréquence transmise par les institutions métrologiques par téléphone ou par radio et captée par un récepteur.

Quant à l'erreur relative de la mesure de la fréquence  $f'$ , qui résulte de l'équation (2), elle est d'autant plus grande que le rapport  $\frac{f}{f'}$  est plus grand, si on néglige l'erreur de la détermination de  $f_0$ . Ainsi, si  $f' \leq 10$  Hz, on a alors avec  $\frac{\Delta f}{f} = 10^{-3}$  et  $f_0 \approx 2\,000$  Hz

$$\frac{\Delta f'}{f'} \leq 2 \times 10^{-3}.$$

Ainsi, plus la fréquence du générateur de référence  $f_0$  s'approchera de la fréquence à mesurer  $f$ , plus la mesure de l'intensité du champ magnétique sera précise. Cette intensité est déterminée d'après la formule

$$(3) \quad H = \frac{2\pi}{\gamma\mu} (f_0 \pm f').$$

On utilise également en pratique un dispositif de comptage permettant de mesurer directement le nombre d'impulsions par seconde.

#### MESURE DU CHAMP MAGNÉTIQUE DES BOBINES DE HELMHOLTZ

La méthode de résonance magnétique nucléaire ne permet de mesurer que le vecteur sommaire du champ magnétique, indépendamment du nombre des sources de champ et de leurs directions. Lors de la mesure du champ magnétique  $H$  de n'importe quelle bobine, on superpose toujours sur cette dernière tous les champs extérieurs  $H_s$  où le champ magnétique terrestre prédomine. C'est pourquoi il est nécessaire d'appliquer une méthode de mesure qui élimine entièrement le champ magnétique extérieur ou qui rende son influence négligeable.

La compensation du champ magnétique terrestre peut être réalisée à l'aide de bobines dont l'axe passe dans la direction du vecteur total de l'intensité de ce champ. Cependant, il est impos-

sible de réaliser une compensation totale et il est nécessaire d'envisager l'influence de la partie non compensée de l'intensité du champ magnétique terrestre et de ses variations. Étant donné que l'échantillon placé dans le champ magnétique des bobines de Helmholtz est influencé, en dehors du champ de ces bobines, par la partie non compensée de l'intensité du champ magnétique terrestre, la fréquence de précession des moments magnétiques des noyaux sera déterminée par la grandeur absolue du vecteur qui représente la somme géométrique de l'intensité du champ magnétique des bobines de Helmholtz  $H_K$  et de la partie non compensée  $T$  du champ terrestre. Décomposons le vecteur  $T$  en deux composantes  $X$  (dans la direction du champ des bobines) et  $Y$  (dans la direction perpendiculaire). Alors, les fréquences de la précession des moments magnétiques des noyaux  $\omega_1$  et  $\omega_2$  pour des directions différentes du champ  $H_K$  seront déterminées à partir des relations

$$(4) \quad \omega_1 = \gamma \rho |H_1| = \gamma \rho \sqrt{(H_K + X)^2 + Y^2},$$

$$(5) \quad \omega_2 = \gamma \rho |H_2| = \gamma \rho \sqrt{(H_K - X)^2 + Y^2}.$$

Par addition de ces équations on obtient

$$(6) \quad \frac{\omega_1 + \omega_2}{\gamma \rho} = H_K \left\{ \left[ \left( 1 + \frac{X}{H_K} \right)^2 + \frac{Y^2}{H_K^2} \right]^{\frac{1}{2}} + \left[ \left( 1 - \frac{X}{H_K} \right)^2 + \frac{Y^2}{H_K^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right\},$$

ou, après décomposition suivant les puissances de  $\frac{X}{H_K}$  et  $\frac{Y^2}{H_K^2}$ ,

$$(7) \quad \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} = \gamma \rho H_K \left( 1 + \frac{Y^2}{2H_K^2} - \frac{1}{8} \frac{Y^4}{H_K^4} + \frac{X^2 Y^2}{4H_K^3} + \dots \right).$$

L'équation (7) donne la possibilité d'apprécier l'erreur due à la compensation incomplète de l'intensité du champ magnétique terrestre. Pour que les termes correctifs ne dépassent pas  $10^{-6}$ , il est nécessaire que la composante transversale  $Y$  ne dépasse pas  $1,4 \times 10^{-3} H_K$ , soit  $85 \times 10^{-5}$  Oe, avec  $H_K = 0,6$  Oe. La composante longitudinale  $X$  peut atteindre dans ce cas la valeur  $H_K$ .

On peut réaliser sans trop de difficultés la compensation de façon qu'on puisse négliger tous les termes correctifs, car la présence de la composante transversale  $Y$ , de  $85 \times 10^{-3}$  Oe et moins, peut être détectée par un dispositif à sonde ferromagnétique. C'est pourquoi on peut poser avec une précision de  $10^{-6}$  que

$$(8) \quad \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} = \omega_m = \gamma \rho H_K.$$

L'équation (8) n'est valable que dans le cas où le vecteur  $T$  est constant dans le temps. En réalité, par suite des variations

de l'intensité du champ magnétique terrestre, ce vecteur subit un changement tant en grandeur qu'en direction.

Supposons que durant l'intervalle de 1 à 2 min entre les mesures de fréquence pour les deux directions du champ des bobines de Helmholtz, les composantes de l'intensité du champ magnétique aient varié de  $\delta X$ ,  $\delta Y$  et  $\delta Z$ . Dans ce cas, l'équation (6) devient

$$\frac{\omega_1 + \omega_2}{\gamma_p} = H_K \left\{ \left[ \left( 1 + \frac{X}{H_K} \right)^2 + \frac{Y^2}{H_K^2} \right]^{\frac{1}{2}} + \left[ \left( 1 - \frac{X + \delta X}{H_K} \right)^2 + \frac{(Y + \delta Y)^2}{H_K^2} + \frac{\delta Z^2}{H_K^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}.$$

Étant donné que les variations durant cet intervalle ne dépassent pas en général  $20$  à  $50 \times 10^{-3}$  Oe et que les valeurs de  $X$  et de  $Y$  sont faibles aussi, on peut, lors du développement en série de cette équation, négliger tous les termes à l'exception du premier. Nous avons alors

$$(9) \quad \omega_m = \gamma_p H_K \left( 1 - \frac{\delta X}{2 H_K} \right).$$

Pour  $\delta X = 6 \times 10^{-3}$  Oe et  $H_K = 60\,000 \times 10^{-3}$  Oe, le terme correctif de l'équation (9) atteint  $5 \times 10^{-5}$ , ce qui montre qu'il est nécessaire, lors des mesures, de tenir compte des variations du champ magnétique dont la valeur est voisine de celle du champ magnétique terrestre.

En se basant sur l'équation (9), on peut déduire la valeur du coefficient gyromagnétique du proton, si l'on profite de la valeur calculée de l'intensité du champ magnétique des bobines de Helmholtz ou de n'importe quelle autre source de champ.

#### DESCRIPTION DES BOBINES DE HELMHOLTZ

Pour mesurer  $\gamma_p$ , on a fabriqué sept bobines de Helmholtz sur un cylindre creux en quartz fondu de 25 mm environ d'épaisseur de parois, ce qui garantit ainsi une stabilité satisfaisante et une absence de déformations. Pour assurer commodément le montage et le centrage du capteur au centre des bobines, ainsi que le centrage des bobines elles-mêmes par rapport au système de compensation, le cylindre en quartz est muni de trois orifices symétriques de 100 mm environ de diamètre.

L'enroulement des bobines est constitué de câble nu en cuivre posé dans une rainure hélicoïdale taillée sur la surface du cylindre en quartz au pas de  $2p = 1,2$  mm. Les sections des bobines sont reliées entre elles par un conducteur coaxial qui est parallèle à leur axe.

Les dimensions géométriques, mesurées dans les laboratoires du V. N. I. I. M., sont les suivantes :

TABLEAU I

Bobines N°	Rayon moyen, $R_m$ ( $\mu m$ )	Longueur moyenne, $L_m$ ( $\mu m$ )	Rayon du câble, $\rho$ ( $\mu m$ )	Constante des bobines, $K$ (Oe/A)
3 ...	134 865,1	135 006,4	473,5	0,666 304
4 ...	134 538,8	136 267,5	473,5	0,663 195
5 ...	152 654,0	153 516,0	476,0	0,587 042
6 ...	155 706,0	155 900,0	476,0	0,577 048
7 ...	155 960,2	156 001,5	400,0	0,576 450
8 ...	156 006,0	155 996,4	400,0	0,576 352
9 ...	156 005,8	156 003,2	400,0	0,576 379

#### BOBINE CARRÉE DE COMPENSATION

Le dispositif qui compense l'intensité du champ magnétique terrestre doit avoir : 1° une grande uniformité du champ de compensation; 2° un accès libre à l'espace où est compensé le champ magnétique terrestre; 3° une fabrication simple.

La bobine carrée satisfait le mieux à ces conditions. Selon les calculs théoriques son uniformité est supérieure à celle des bobines de Helmholtz.

D'après les recherches de Heller [6], la meilleure uniformité du champ magnétique d'une bobine carrée est obtenue lorsque le rapport de la distance entre les plans des spires  $d$  au côté  $a$  du carré est égal à 0,544 505.

Afin d'augmenter l'uniformité du champ de la bobine carrée de compensation, on peut appliquer une méthode simple et efficace qui permet d'éliminer les termes des 2<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> ordres dans le développement en série de  $H$ . L'idée principale de cette méthode se base sur le fait que la bobine supplémentaire (de correction) de plus petite dimension, montée d'une manière coaxiale avec la bobine de compensation, est connectée avec elle en série pour que la direction de son champ soit en sens inverse de celui de la bobine de compensation.

Pour les bobines avec les conditions  $\frac{d}{a} = 0,544 505$ , pour lesquelles disparaît le terme du 4<sup>e</sup> ordre, on obtient

$$(10) \quad \frac{W_1}{W_2} = \left( \frac{a_1}{a_2} \right)^3; \quad I_1 = I_2,$$

c'est-à-dire que les deux bobines peuvent être branchées en série.

En se basant sur les conditions théoriques, on a construit un système de deux bobines carrées pour compenser l'intensité du champ magnétique terrestre. La grande bobine (de compensation), dont les dimensions sont  $a = 69,10$  cm,  $d = 37,6$  cm, est fabriquée en hêtre. L'enroulement des 124 spires de la bobine est fait avec du fil soviétique « пәлмо », d'un diamètre de 1,5 mm et d'une résistance de 15  $\Omega$  environ. La constante pour le centre de la bobine est

$$K = \frac{1,6 \pi w a^2}{(a^2 + d^2) \sqrt{2a^2 + d^2}} = 1,476 \text{ Oe/A.}$$

La bobine de correction est fabriquée aussi en hêtre. Elle se compose de deux enroulements (intérieur et extérieur) de 12 spires chacun. Les dimensions linéaires de la bobine sont  $a' = 43,10$  cm,  $a'' = 43,29$  cm,  $d = 23,49$  cm. Les constantes de cette bobine pour chaque enroulement sont

$$K' = 0,2267, \quad K'' = 0,2263 \text{ Oe/A.}$$

L'enroulement extérieur de la bobine de correction satisfait à la condition (10). Avec cela, la constante résultante du système est

$$K_R = K - K'' = 1,241 \text{ Oe/A.}$$

#### BOBINES DE RÉCEPTION ET DE POLARISATION (SONDE)

Le premier élément du schéma de mesure de l'intensité du champ magnétique est une sonde constituée par deux bobines dont les axes sont perpendiculaires entre eux.

La bobine de réception a un enroulement de 9 000 spires en fil « пәл » de 0,18 mm de diamètre. Le bobinage fractionné augmente la constante de la bobine qui atteint 15 à 20. A l'intérieur de la bobine se trouve une ampoule remplie d'eau distillée d'un volume de 3 cm<sup>3</sup>. La bobine réceptrice est entourée par une bobine de polarisation de 3 000 spires en fil « пбд » de 1,7 mm de diamètre. Cette bobine est alimentée par une batterie de 120 V, ce qui donne la possibilité d'avoir en son centre une intensité de champ magnétique de l'ordre de 2 000 Oe environ.

#### DISPOSITIF POUR MESURER LA FRÉQUENCE

Le second élément du schéma est un dispositif pour mesurer la fréquence. L'intensité du signal de la précession nucléaire de fréquence  $f$  est envoyée par l'amplificateur au multiplicateur de fréquence, dont le coefficient de multiplication  $h$ , généralement

égal à 2 ou 4, est choisi selon la valeur de la constante des bobines de Helmholtz. Du multiplicateur, le signal de la précession nucléaire est envoyé au mélangeur. La fréquence  $f_0$ , obtenue par la division de la fréquence du générateur à quartz thermostaté, est envoyée au même mélangeur. La fréquence  $f_0$  est rendue voisine de  $hf$ . Le mélangeur fournit la fréquence différentielle  $f'$  qui est envoyée à l'oscillographe à boucle. Les repères de temps à la fréquence 100 Hz, qui résultent de la division par 1000 de la fréquence 100 kHz du générateur à quartz, sont envoyés au même oscillographe.

Pour mesurer la fréquence de la précession des protons dans le champ magnétique des bobines de Helmholtz ( $f = 2\,502,6$  Hz), on a utilisé la fréquence  $f_0 = 10\,000$  Hz obtenue en divisant par 10 la fréquence du générateur à quartz. La fréquence différentielle  $f'$  était voisine de 10 Hz.

#### MÉTHODE DE MESURE

La mesure de  $\gamma_p$  a été effectuée à l'aide de l'installation décrite ci-dessus de la façon suivante. Les bobines de Helmholtz sur un support en quartz étaient montées avec leur axe dans la direction de la composante horizontale du champ magnétique terrestre; l'axe de la bobine de polarisation était placé perpendiculairement à l'axe de la bobine de compensation et à l'axe des bobines sur le support en quartz. Après avoir effectué la compensation de la force magnétique terrestre, la bobine de polarisation était réglée par rapport aux bobines sur le support en quartz et à la bobine de compensation, de façon telle que la bobine de polarisation ne leur envoyait pas de force électromotrice d'induction pendant la mise en circuit et hors circuit du courant de polarisation de l'échantillon. On se servait des galvanomètres destinés à mesurer le courant d'enroulement des bobines correspondantes comme indicateur de cette force électromotrice. Pour obtenir une décharge stable de la batterie, on branchait les enroulements des deux sources H dans le circuit des batteries d'accumulateurs une heure avant le début des mesures. L'échantillon était soumis à la polarisation pendant 5 s; après cela on débranchait le courant de la bobine de polarisation à l'aide d'un commutateur à étouffement d'étincelles. La mise en circuit de l'oscillographe à boucle s'effectuait en même temps que la mise hors circuit du courant de polarisation et le signal du repère lumineux était filmé sur un variomètre. Au cours des mesures on effectuait le contrôle continu de la fréquence du générateur à quartz d'après la fréquence transmise par l'Institut des Mesures Physicotechniques et Radio-techniques de l'U. R. S. S.

ERREURS DE MESURE DE  $\gamma_p$ . ERREURS ACCIDENTELLES.

Les erreurs accidentelles dans la détermination de  $\gamma_p$  dépendent des causes suivantes :

1<sup>o</sup> compensation incomplète de la force électromotrice de la pile étalon;

2<sup>o</sup> changement du courant dans la bobine de compensation au moment de la seconde lecture (enregistrement) de la fréquence faite dans le sens inverse du courant dans les bobines sur support en quartz;

3<sup>o</sup> erreur de mesure de la température de la pile étalon, de la bobine de résistance de référence et du support en quartz des bobines de Helmholtz;

4<sup>o</sup> imprécision de la « lecture » de la fréquence d'après les enregistrements de la fréquence différentielle filmés par l'oscillographe à boucle;

5<sup>o</sup> variations de la composante horizontale du champ magnétique terrestre.

L'ordre de grandeur des erreurs ci-dessus est évalué ci-après :

1. La compensation incomplète provoque sur l'intensité de courant une erreur

$$\frac{\Delta I}{I} = 6 \times 10^{-7}.$$

2. Le changement du courant dans la bobine de compensation provoque sur l'intensité du champ une erreur

$$\Delta H = 0,8 \times 10^{-6} \text{ Oe.}$$

3. L'erreur de mesure de la température provoque sur l'intensité de courant une erreur

$$\frac{\Delta I}{I} = 4,5 \times 10^{-7},$$

et sur la valeur de la constante de la bobine une erreur

$$\frac{\Delta K}{K} = 2 \times 10^{-8}.$$

4. L'erreur accidentelle de la mesure de la fréquence  $f$  est de l'ordre de

$$\frac{\Delta f}{f} = 6 \times 10^{-6}.$$

5. L'erreur liée à l'introduction de la correction pour les variations de la composante horizontale du champ magnétique terrestre peut atteindre dans ce cas

$$\frac{\Delta H}{H} = 3 \times 10^{-5}.$$

Il est à noter que, compte tenu du caractère accidentel de cette erreur, son influence sur le résultat peut être diminuée par un traitement correspondant des séries d'observation.

#### ERREURS DE MESURE UTILISÉES

Les erreurs qu'on ne peut pas éliminer par la réalisation correspondante des observations peuvent être évaluées d'après la loi d'addition des erreurs moyennes, c'est-à-dire

$$(11) \quad \frac{\Delta \gamma_p}{\gamma_p} = \sqrt{\left| \frac{\Delta K}{K} \right|^2 + \left| \frac{\Delta f}{f} \right|^2 + \left| \frac{\Delta I}{I} \right|^2}.$$

L'erreur  $\frac{\Delta K}{K}$  est égale, d'après les calculs, à  $13 \times 10^{-6}$ .

L'erreur  $\frac{\Delta f}{f}$  dépend de l'erreur sur la fréquence transmise par l'Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques, et de l'erreur de sa comparaison avec la fréquence du générateur à quartz. Ces deux erreurs sont du même ordre et ne dépassent pas  $0,5 \times 10^{-6}$ .

La stabilité de la fréquence du générateur à quartz au cours des mesures (10 à 35 min), après un chauffage d'une heure du dispositif fréquencesmètre, ne dépasse pas non plus  $0,5 \times 10^{-6}$ . En outre, la fréquence de ce générateur s'accorde au cours des mesures.

On peut déterminer l'erreur  $\frac{\Delta I}{I}$  à partir de la relation

$$\frac{\Delta I}{I} = \sqrt{\left| \frac{\Delta E_N}{E_N} \right|^2 + \left| \frac{\Delta R_N}{R_N} \right|^2},$$

où  $E_N$  = force électromotrice de la pile étalon,  $R_N$  = résistance de la bobine étalon. Donc, l'erreur sur la mesure du courant est

$$\frac{\Delta I}{I} = 1,7 \times 10^{-6}.$$

Si l'on tient compte de l'erreur de la reproduction de l'ampère absolu, celle de la détermination de la grandeur du courant en

unités absolues sera de  $1 \times 10^{-3}$  [7], et l'erreur de la détermination de  $\gamma_p$ , calculée d'après la formule (11), sera

$$\frac{\Delta\gamma_p}{\gamma_p} = 1,6 \times 10^{-3}.$$

En dehors des erreurs qui résultent directement de l'expression analytique pour la détermination de  $\gamma_p$ , il existe encore deux erreurs systématiques qui sont liées à l'influence des champs supplémentaires sur la force magnétique des bobines de Helmholtz. Ces champs prennent naissance par suite de l'influence des pièces de la sonde et l'aimantation de l'échantillon diamagnétique.

La bobine de réception et celle de polarisation qui jouent ici le rôle d'un écran n'ont pas une longueur infinie et elles se trouvent dans un champ magnétique non uniforme. Cependant, l'ordre de grandeur du coefficient de l'effet d'écran sera le même que celui des calculs théoriques. Si on considère que le corps de la bobine (soit le corps de la bobine de réception) est en cuivre pur  $\chi = 0,66 \times 10^{-6}$ , la force magnétique à l'endroit de l'échantillon différera de celle des bobines d'environ  $1 \times 10^{-11}$ , c'est-à-dire que la variation du champ sera petite et négligeable.

Le champ influençant le noyau qui se trouve dans l'échantillon diamagnétique différera du champ extérieur  $H_k$  de

$$\Delta H' = \left( \frac{4}{3} \pi - k \right) \chi H_k,$$

où  $\chi$  est la susceptibilité de l'échantillon et  $k$  un coefficient déterminé par la forme de l'échantillon.

On utilise dans les essais en cours un échantillon sphérique dont le coefficient  $k$  est égal à  $\frac{4}{3} \pi$ , c'est-à-dire que l'on a  $\Delta H' = 0$ .

#### RÉSULTATS DES MESURES

On a effectué 10 à 15 séries de mesures pour chaque bobine de Helmholtz; chaque série comprenait 15 observations. Les résultats de ces mesures sont donnés dans le tableau II.

D'après ces résultats, on voit que la divergence des valeurs de  $\gamma_p$  obtenues dans le champ magnétique de bobines différentes surpasse considérablement l'erreur de la détermination de  $\gamma_p$  dans le champ magnétique de bobines séparées. Cela indique l'existence d'erreurs systématiques lors de la détermination de la constante de chaque bobine de Helmholtz, qui dépassent les erreurs des calculs théoriques. Par conséquent, l'erreur systématique non éliminée est due à des facteurs qu'on ne peut pas considérer théoriquement. Ces facteurs peuvent être :

1. Le contrôle insuffisant de l'influence des conducteurs de connexion et de ceux d'alimentation.

2. L'écart possible de la valeur moyenne vraie du diamètre des bobines et de la distance entre les enroulements par rapport à la valeur obtenue par la mesure de leurs dimensions géométriques.

Cependant, les erreurs systématiques mentionnées peuvent être ramenées à des erreurs accidentelles s'il y a un grand nombre de bobines de Helmholtz, puisque dans ce cas leur nature devient accidentelle. C'est pourquoi, à l'avenir, en dehors des causes d'erreurs systématiques soigneusement étudiées, il est nécessaire de continuer la détermination de  $\gamma_p$  dans le champ magnétique avec un plus grand nombre de bobines de Helmholtz.

TABLEAU II

Bobines Nos	$\gamma_p$ ( $0e^{-1}, s^{-1}$ )	Erreur quadratique moyenne limite du résultat ( $\times 10^4$ %)	Écart par rapport à la moyenne
3 .....	26 749,8	4	-1,6
4 .....	50,8	4	0,0
5 .....	52,2	4	+1,4
6 .....	51,9	4	+1,1
7 .....	49,7	4	-1,1
8 .....	51,5	4	+0,7
9 .....	49,5	4	-1,3
Moyenne...	26 750,8		

CONCLUSION

1. On a élaboré la méthode et on a construit les appareils pour la détermination de  $\gamma_p$  par la méthode de l'induction nucléaire libre.

2. On a fait l'analyse théorique des erreurs systématiques propres à cette méthode. Il en résulte qu'après avoir apporté les corrections, les erreurs systématiques restantes et non éliminées ne doivent pas dépasser  $16 \times 10^{-6}$  pour une bobine de Helmholtz. Cependant, les études expérimentales ont montré que la valeur de ces erreurs systématiques est importante et qu'elles semblent être liées seulement à la détermination du champ des bobines. Quant aux erreurs accidentelles (erreur quadratique

moyenne limite du résultat), elles peuvent être ramenées à une valeur de l'ordre de  $2 \times 10^{-6}$ .

3. On a effectué la détermination de  $\gamma_p$  dans le champ magnétique de sept bobines de Helmholtz et on a obtenu la valeur moyenne

$$\gamma_p = 26\,750,8 \pm 0,5 \text{ Oe}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{sans correction diamagnétique}).$$

L'erreur mentionnée ici est obtenue par addition de l'erreur de la reproduction de l'ampère absolu et de l'erreur quadratique moyenne du résultat obtenu en partant des données du tableau II.

4. On a tracé les voies ultérieures pour la réalisation des travaux qui permettront de réduire les erreurs dans la détermination de  $\gamma_p$  en unités absolues.

(Octobre 1961)

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] THOMAS (H. A.), DRISCOLL (R. L.) et HIPPLE (I. A.), *Phys. Rev.*, 75, 1949, p. 902.
- [2] WILHELMY (W.), *Ann. der Phys.*, 19, 1957, p. 329.
- [3] DRISCOLL (R. L.) et BENDER (R. L.), *I. R. E. Trans. Instr.*, I-7, nos 3-4, 1958, p. 176.
- [4] YANOVSKY (B. M.), STOUDETSOV (N. V.) et TIKHOMIROVA (T. N.), Sur la mesure du coefficient gyromagnétique du proton dans le champ magnétique faible, *Izmeritelnaïa Tekhnika*, n° 2, 1959, p. 39.
- [5] PACKARD (M. E.) et VARIAN (R.), *Phys. Rev.*, 93, 1954, p. 941.
- [6] HELLER (C.), *Deutsche Hydrographische Ztsch.*, 8, n° 4, 1955, p. 157.
- [7] GORBATSÉVITCH (S. V.) et VOLKOV (N. A.), Mesures absolues de l'intensité de courant, *Trud. V. N. I. I. M.*, 1953, n° 15 (75).

## ANNEXE 13

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Allemagne)

---

### DÉTERMINATION ABSOLUE DU COEFFICIENT GYROMAGNÉTIQUE DU PROTON

Par R. OCHSENFELD et H. CAPPTULLER

(Traduction)

---

Le coefficient gyromagnétique du proton  $\gamma_p$ , la fréquence de précession du proton  $\omega$  et la densité de flux  $B$  du champ magnétique extérieur sont liés par la relation  $\omega = \gamma_p B$ .

La détermination absolue de  $\gamma_p$  à partir de cette relation s'appuie sur la détermination possible avec une grande précision de la fréquence de précession  $\omega$  et sur une mesure absolue précise de la densité de flux magnétique  $B$ . Cette dernière mesure peut être faite en déterminant, à l'aide d'un dispositif tel que la balance magnétique ou la balance de Cotton, la force d'attraction qui agit sur un conducteur placé dans l'entrefer d'un électro-aimant et parcouru par un courant d'intensité  $I$ . Dans cette méthode, les dimensions du conducteur doivent être connues avec une très grande précision. Par une mesure différentielle, il est cependant possible de réduire le nombre des déterminations à effectuer à une seule : celle de la distance comprise entre deux conducteurs. Pour une « bobine rectangle » spéciale, dans laquelle l'écartement des conducteurs peut être modifié et mesuré avec un étalon à bouts en quartz, aux écartements  $x_1$  et  $x_2$  correspondent les forces  $F_1$  et  $F_2$ . On a alors

$$\frac{F_1}{C_{01}} - \frac{F_2}{C_{02}} = N \cdot I \cdot B (x_1 - x_2) C_{2y},$$

où  $C_{01}$  et  $C_{02}$  sont les corrections, pour la bobine rectangle à  $N$  spires, dues à l'inhomogénéité du champ au point milieu des pièces polaires, et  $C_{2y}$  est la correction due au défaut de parallélisme des portions de conducteur verticales et à la topographie

du champ. Ces corrections sont calculables par intégration numérique à partir d'une connaissance suffisante de la variation du champ et des coordonnées de la bobine rectangle.

La bobine rectangle (*fig. 1*) est formée de  $N = 2 \times 9$  spires montées de chaque côté de deux supports en verre à section en T. En trois endroits sont mastiquées des pièces en quartz optiquement planes qui peuvent être collées par adhérence, ou bien séparées par interposition d'un étalon à bouts qui mesure ainsi la variation d'écartement des conducteurs. Pour rendre possible cette variation d'écartement, les extrémités supérieure et inférieure du bobinage sont sans support, en forme d'arc, et suffisamment flexibles. La résultante verticale de la force qui s'exerce sur les portions de conducteur placées dans le champ magnétique est proportionnelle à la longueur de la projection sur le plan horizontal de ces portions de conducteur. Ainsi, dans un champ homogène, la force dépend seulement de la largeur réelle de la bobine, quelle que soit la courbure des conducteurs. Dans le cas présent où le champ est non homogène compte tenu de la largeur de la bobine, les corrections  $C_{01}$ ,  $C_{02}$  et  $C_{cy}$  doivent être déterminées.

Les deux mesures  $F_1$  et  $F_2$  ont été faites au moyen d'une balance d'analyse sensible, par pesées ( $m_1 \approx 17$  g et  $m_2 \approx 27$  g) avec une précision de  $6 \times 10^{-6}$ . Les corrections  $C_{01}$  et  $C_{02}$  ont pu être calculées à  $1 \times 10^{-3}$  et  $C_{cy}$  à  $3 \times 10^{-3}$  près. Les incertitudes des corrections dépendent seulement de la variation du champ et de la qualité de construction de la bobine rectangle; elles peuvent être réduites sensiblement suivant les conditions de réalisation.

La bobine est suspendue par l'intermédiaire d'un étrier qui repose sur un couteau de la balance (*fig. 2*). La charge de tout l'appareillage s'élevait à 0,5 kg environ. L'alimentation électrique à la partie supérieure de la bobine se faisait par deux rubans de cuivre recuit, de 30 cm de longueur et de  $(10 \times 0,02)$  cm<sup>2</sup> de section environ. L'intensité de courant de 1 A environ pouvait être déterminée à mieux que  $1 \times 10^{-3}$  près, par comparaison directe de la chute de tension aux bornes d'une résistance étalon de 1  $\Omega$  avec la force électromotrice d'un élément Weston « international ».

Pour détecter la précession de résonance et mesurer la fréquence de précession, l'oscillateur d'un détecteur de résonance modifié suivant Pound et Knight était synchronisé à 12,1 MHz par multiplication de la fréquence étalon de 100 kHz dérivée de l'horloge à quartz de la P. T. B. Pour les essais de résonance, on se servait d'un petit tube de verre rempli d'huile minérale, autour duquel la bobine oscillante était enroulée. L'intensité du champ magnétique directeur, superposé à un champ alternatif de 50 Hz de faible amplitude, était réglée à la valeur de réso-

nance par modification du courant dans l'électro-aimant et stabilisée par régulateur de courant et régulateur de flux. Les signaux de résonance sortant du détecteur de résonance à inter-

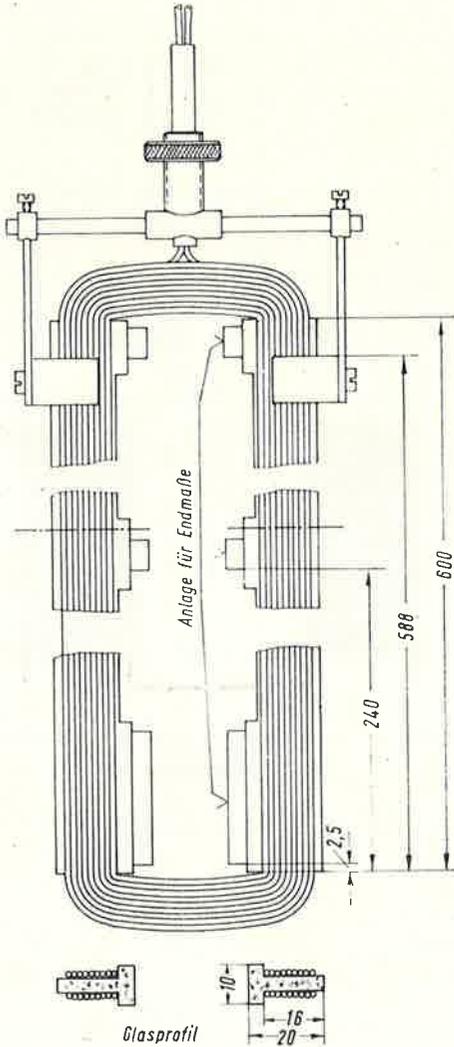


Fig. 1. — Bobine rectangle.

valles de  $0,01$  s étaient convertis en impulsions de  $1 \mu s$  environ par un formeur électronique d'impulsions, et se présentaient sous forme d'impulsions fines sur un oscillographe à balayage

circulaire à fréquence 100 Hz. La coïncidence de deux signaux de résonance voisins dans le temps garantissait alors l'accord champ magnétique-fréquence de résonance à  $5 \times 10^{-6}$  près.

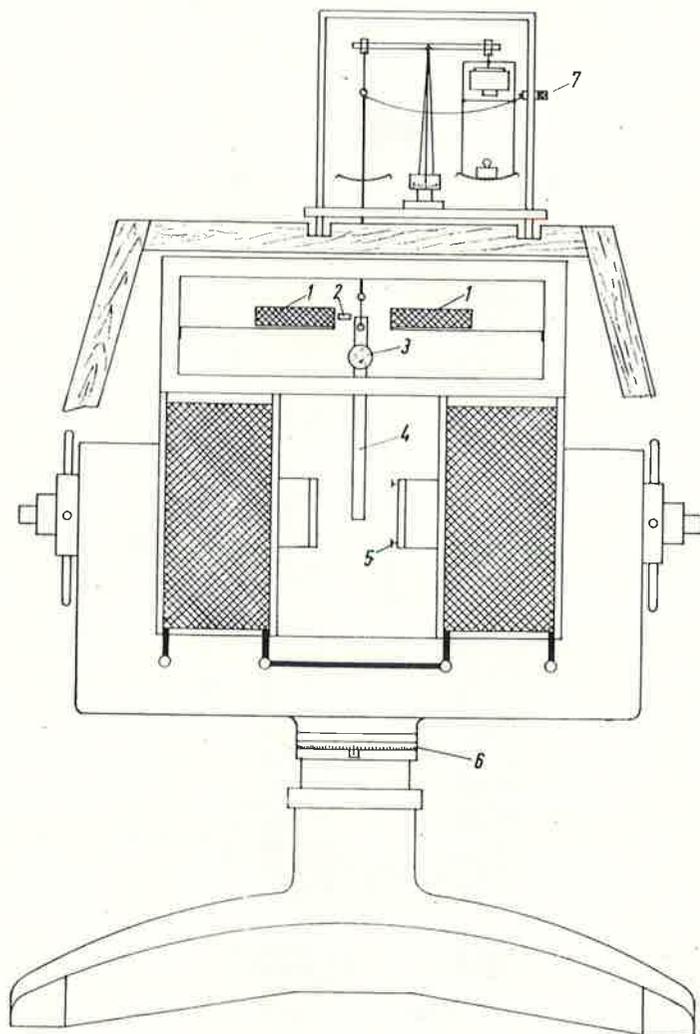


Fig. 2. — Balance magnétique.

1, bobine de compensation du champ de fuite; 2, indicateur de compensation; 3, miroir; 4, bobine rectangulaire; 5, dispositif pour l'obtention d'un champ symétrique; 6, couronne mobile graduée; 7, arrivées de courant pour la bobine rectangulaire.

La gravité au lieu de mesure, nécessaire pour le calcul des forces, a pour valeur dans le système de Potsdam

$$g = 9,812\ 66 \pm 0,000\ 05\ \text{m/s}^2.$$

Avec  $F_{1,2} = m_{1,2} g$  et compte tenu de la correction de poussée de l'air, la densité de flux déterminée avec la balance magnétique à la fréquence de résonance de 12,1 MHz est de  $B_0 = 0,284\ 186_5\ \text{Wb/m}^2$ .

On obtient ainsi pour le coefficient gyromagnétique du proton dans l'huile minérale

$$\gamma_p = (2,675\ 22 \pm 0,000\ 10) \times 10^8\ \text{Wb}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}.$$

Dans la valeur numérique ci-dessus, il n'a pas encore été tenu compte de l'effet d'écran du cortège électronique. La correction diamagnétique pour l'huile minérale atteint, d'après les calculs de Ramsey et les mesures de Thomas, la valeur relative  $2,84 \times 10^{-6}$  environ. En appliquant cette correction diamagnétique, le coefficient gyromagnétique du proton devient

$$\gamma_p = (2,675\ 30 \pm 0,000\ 10) \times 10^8\ \text{Wb}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}.$$

(Août 1961)

Electrotechnical Laboratory (Japon)

---

ÉTAT ACTUEL DE LA MESURE DE  $\gamma_p$  A L'E. T. L.  
(POUR SON UTILISATION COMME ÉTALON D'INTENSITÉ)

(Traduction)

---

Un champ magnétique peut être fixé par un courant connu parcourant un solénoïde de dimensions géométriques déterminées avec précision. Par suite, la stabilité de l'étalon d'intensité peut être vérifiée en suivant la variation de la fréquence de précession du proton dans le champ connu ainsi obtenu. Dans cette voie, une recherche de base est en cours à l'Electrotechnical Laboratory.

Ce rapport donne un compte rendu de l'étude préliminaire concernant la mesure.

1. *Réalisation d'un champ magnétique connu.* — Le champ magnétique produit au voisinage du centre d'un solénoïde à enroulement hélicoïdal de section finie est donné par une formule sous forme de développement en série, avec une exactitude meilleure que  $10^{-7}$ . On utilisera comme solénoïde producteur du champ une bobine de self-induction pour la détermination de l'ohm.

Une bobine de correction d'effet d'extrémité a été étudiée en utilisant la formule et est actuellement en cours de fabrication. On peut obtenir au centre du solénoïde un champ de 10 Oe.

2. *Détection du signal de précession.* — Nous ne possédons pas actuellement de champ magnétique uniforme artificiel et, par suite, nous étudions la possibilité de détecter le signal de précession dans le champ magnétique terrestre.

La méthode mise au point par Packard et Varian pour le signal de précession libre sera employée en raison de sa simplicité d'installation.

Dans cette méthode, le rapport signal-bruit (S/B) qu'on peut obtenir est théoriquement

$$\frac{S}{B} = \frac{VNfH\zeta}{\sqrt{R\Delta f}} \cdot 10^{-6},$$

- où V = volume de l'échantillon, en cm<sup>3</sup>;  
 N = nombre total de spires de la bobine détectrice;  
 f = fréquence de précession, en Hz;  
 H = champ de polarisation, en Oe;  
 ζ = facteur de remplissage;  
 R = résistance série effective de la bobine détectrice, en Ω;  
 Δf = bande passante du détecteur, en Hz.

Le champ magnétique transitoire associé à la commutation de la bobine détectrice de la source de polarisation au détecteur produit un effet destructeur sur la cohérence de l'aimantation macroscopique de l'échantillon. La condition suivante est exigée pour éviter cet inconvénient

$$\omega_0 \gg \sqrt{2Q\omega_0(\gamma_p H_1)(\gamma_p \Delta H_1)},$$

où ω<sub>0</sub> = pulsation de résonance propre de la bobine détectrice avec les capacités parasites, en s<sup>-1</sup>;

Q = facteur de qualité de la bobine détectrice à la pulsation ω<sub>0</sub>;

H<sub>1</sub> = amplitude moyenne, en Oe, du champ magnétique transitoire dans la bobine détectrice;

ΔH<sub>1</sub> = grandeur des variations locales de H<sub>1</sub> dans l'échantillon, en Oe.

Ces expressions ont été contrôlées expérimentalement avec V = 20 cm<sup>3</sup> et Δf = 100 Hz; une concordance relativement mauvaise a été obtenue, ainsi que l'indiquent les résultats suivants

	f	Signal de sortie	S/B	ω <sub>0</sub> /2π
Expérience.....	1950 Hz	2,5 μV	20	50 kHz
Théorie.....	-	10	160	5

3. *Compensation des variations du champ magnétique terrestre.* — L'endroit où ont lieu les expériences est très troublé par des variations dues à des origines artificielles, sauf pendant deux ou trois heures, au voisinage de minuit, où l'étude préliminaire a montré qu'il était relativement calme. Un dispositif maintenant le solénoïde à angle droit avec le champ terrestre est prévu et est en cours de construction. Il n'est pas certain qu'il fonctionnera de façon satisfaisante.

4. *Stabilisation de l'intensité dans le solénoïde.* — Une méthode simple a été mise au point pour stabiliser l'intensité de courant à mieux que  $10^{-6}$ .

L'étude de base pour cette mesure est en grande partie terminée. Il faudra toutefois encore quelques années pour réaliser l'installation définitive.

(23 août 1961)

ANNEXE 15

National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

---

NOTE SUR LA DÉTERMINATION  
DU COEFFICIENT GYROMAGNÉTIQUE DU PROTON

Par P. VIGOUREUX

---

Le N. P. L. a récemment mesuré le coefficient gyromagnétique du proton par la méthode de la précession libre en champ faible. La moyenne de 40 mesures a donné  $2,675\ 171 \times 10^8 \text{ Wb}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Cette valeur se rapporte à l'ampère maintenu au N. P. L. par des étalons de résistance et de force électromotrice, et n'a pas été corrigée pour la forme sphérique de la cellule et le diamagnétisme de l'eau. On estime que la limite supérieure de l'erreur systématique ne dépasse pas  $11 \times 10^{-6}$ ; l'erreur accidentelle est si petite qu'elle n'intervient guère. La valeur ci-dessus ne diffère que d'un peu plus de  $1 \times 10^{-6}$  de celle du N. B. S. (Driscoll et Bender, 1958) également rapportée aux étalons électriques du N. P. L.; elle est aussi en accord avec la valeur de la P. T. B. (Annexe 13, p. 85) dans les limites des erreurs admises par les deux laboratoires.

Le N. P. L. a l'intention de reprendre cette détermination après construction d'une nouvelle bobine.

(Octobre 1961)

---

## ÉQUILIBRAGE DU PONT DE MAXWELL DANS LA COMPARAISON ENTRE ÉTALONS D'INDUCTANCE ET DE CAPACITÉ

Par C. CHIODI

Le montage le plus généralement employé pour la comparaison d'étalons d'inductance et de capacité est le pont de Maxwell (*fig. 1*). Avec le pont équilibré on a

$$\frac{L}{C} = PS \quad \text{et} \quad R = \frac{PS}{Q},$$

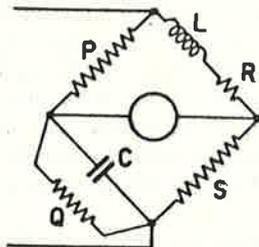


Fig. 1.

si l'on néglige les éléments parasites. Avec des étalons fixes d'inductance et de capacité l'équilibre du pont peut être obtenu par la variation de P ou de S. Mais en courant alternatif il faut choisir des résistances P et S avec une réactance négligeable et munir d'un blindage les bras P, S, C, Q. Si l'on peut négliger, par un montage convenable, la capacité entre Q et son blindage, la relation entre L et C est à l'équilibre

$$(1) \quad L = CPS - R(PK_p + SK_s) + \omega^2 K_p K_s PSL,$$

où R désigne la résistance du bras L,  $K_p$  et  $K_s$  les capacités en parallèle équivalentes aux capacités entre P et S et le blindage.

Si la fréquence n'est pas supérieure à 1000 Hz, le terme  $\omega^2 K_p K_s P S L$  est, en général, négligeable. On peut alors équilibrer le pont par un condensateur variable K branché en parallèle avec P ou S, pourvu que  $L < \text{CPS}$ ; ou encore, par deux condensateurs connectés en parallèle symétriquement sur les deux bras P et S. A notre connaissance, ce procédé d'ajustage n'a jamais été adopté.

L'équation d'équilibre s'écrit alors

$$(2) \quad L = \text{CPS} - R[K_p P + (K_s + K) S].$$

Les éléments variables sont seulement K et Q. Cet ajustage convient particulièrement pour la comparaison des étalons de précision qui diffèrent entre eux dans le rapport de puissances de dix.

Le montage adopté pour un premier essai du pont est schématisé par la figure 2 et utilise le pont auxiliaire de Wagner. Lorsque l'équilibre complet est réalisé, tous les blindages sont au potentiel de la terre. On a fait la comparaison d'une série d'étalons de

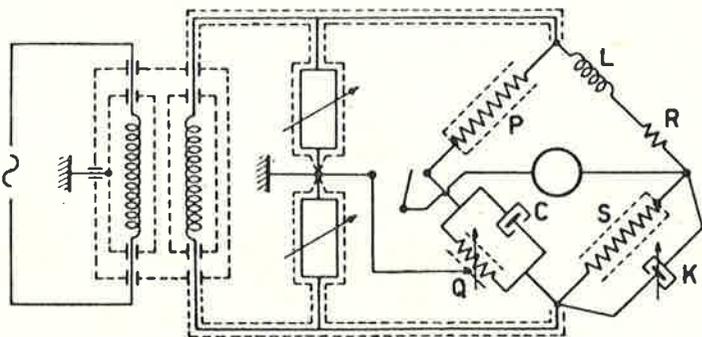


Fig. 2.

capacité de 1, 0,1, 0,01, 0,001  $\mu\text{F}$  avec une série d'étalons d'inductance de 1, 0,1, 0,01, 0,001 H dont la valeur était connue à  $\pm 0,01\%$  près. P et S étaient deux résistances Tinsley de 1000,53 et 1000,66  $\Omega$ , type 4041 à double blindage pour mesures en haute fréquence, accouplées sur une base, avec une capacité de 20 pF entre la résistance et le blindage indépendant. La résistance variable Q était constituée par une série de résistances toroïdales avec blindage indépendant et relié à la terre. Le détecteur était un oscilloscope cathodique, avec amplificateur sélectif.

Les expériences effectuées à 50, 400 et 1000 Hz ont démontré la possibilité d'un ajustage fin et facile, à peu près dans les limites de la précision avec laquelle on connaît la valeur des étalons étudiés, soit  $\pm 0,01$  %. Dans la mesure des étalons de capacité de valeurs plus faibles on rencontre les mêmes difficultés qu'avec les autres systèmes d'ajustage.

Naturellement, avec deux résistances P et S dont le produit serait d'environ  $10^7$ , on pourrait effectuer des comparaisons entre des couples d'étalons de capacité et d'inductance en utilisant les rapports 10 ou 0,1.

(2 octobre 1961)

## ANNEXE 17

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Allemagne)

### TENSIONS DE RÉFÉRENCE PRODUITES A L'AIDE DE DIODES ZENER

Par W. HETZEL et F. MELCHERT

Pour la réalisation de tensions de référence exactes et reproductibles, on profite avec succès depuis quelques années, dans la technique de mesure et de contrôle, de l'effet Zener<sup>(1)</sup> qu'on peut produire dans les diodes en silicium. Seule une petite fraction (1/10 à 1/100) d'un changement éventuel du courant se manifeste dans la tension. Avec des combinaisons de plusieurs diodes cette fraction peut être diminuée davantage. En ce qui concerne l'exactitude et la stabilité, les tensions « Zener » approchent celles des éléments étalons pour autant que l'on emploie des diodes sélectionnées<sup>(2)</sup>.

On a étudié à la P. T. B. des diodes Zener d'origine allemande qui sont destinées à la réalisation d'une tension nominale de 11 V. Le schéma du circuit pour les mesures est reproduit dans la figure 1. Le courant continu parcourant la diode a été réglé avec une exactitude superflue à l'aide d'un élément étalon, mais il est aussi possible d'utiliser le courant d'un circuit stabilisé. On a d'abord déterminé les caractéristiques de la tension en fonction du courant et de la température; le coefficient de température à 25°C était  $40 \times 10^{-6}$ /deg et le changement relatif de la tension correspondant à une variation du courant au point de fonctionnement était d'environ 1/30. Une variation cyclique de température entre 55°C et 140°C produisait un changement permanent de la tension de 50 millièmes en moyenne. Après un intervalle d'un mois, on commençait la surveillance périodique des tensions

(1) ZENER (C.), *Proc. Roy. Soc. London*, A-145, 1934, p. 523-529.

(2) BAHER et NAGY, *I. R. E. Trans. on Instrumentation*, I-9, Sept. 1960, Nr. 2, p. 226-231.

de 10 diodes. Les diodes étaient chauffées à 25°C, mais dans l'intervalle entre les mesures la température était 20°C.

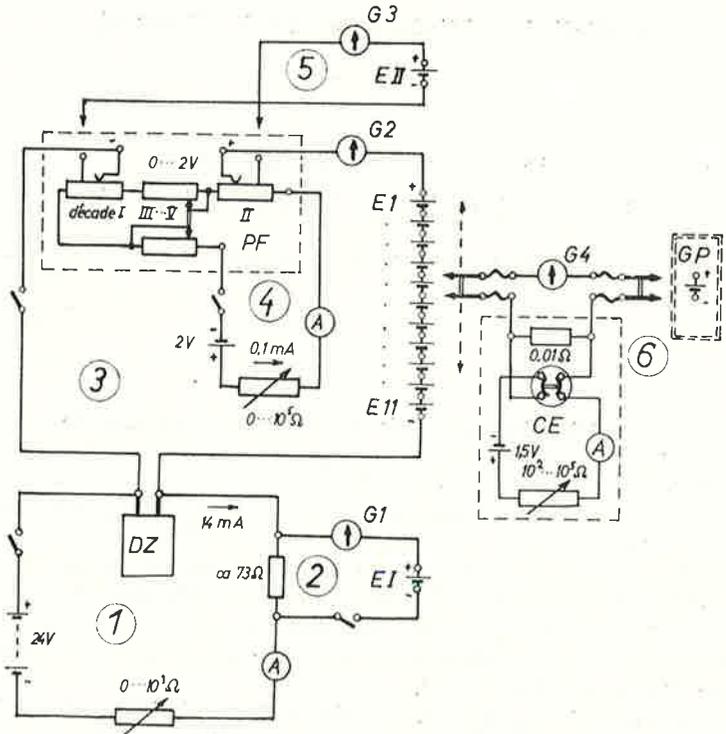
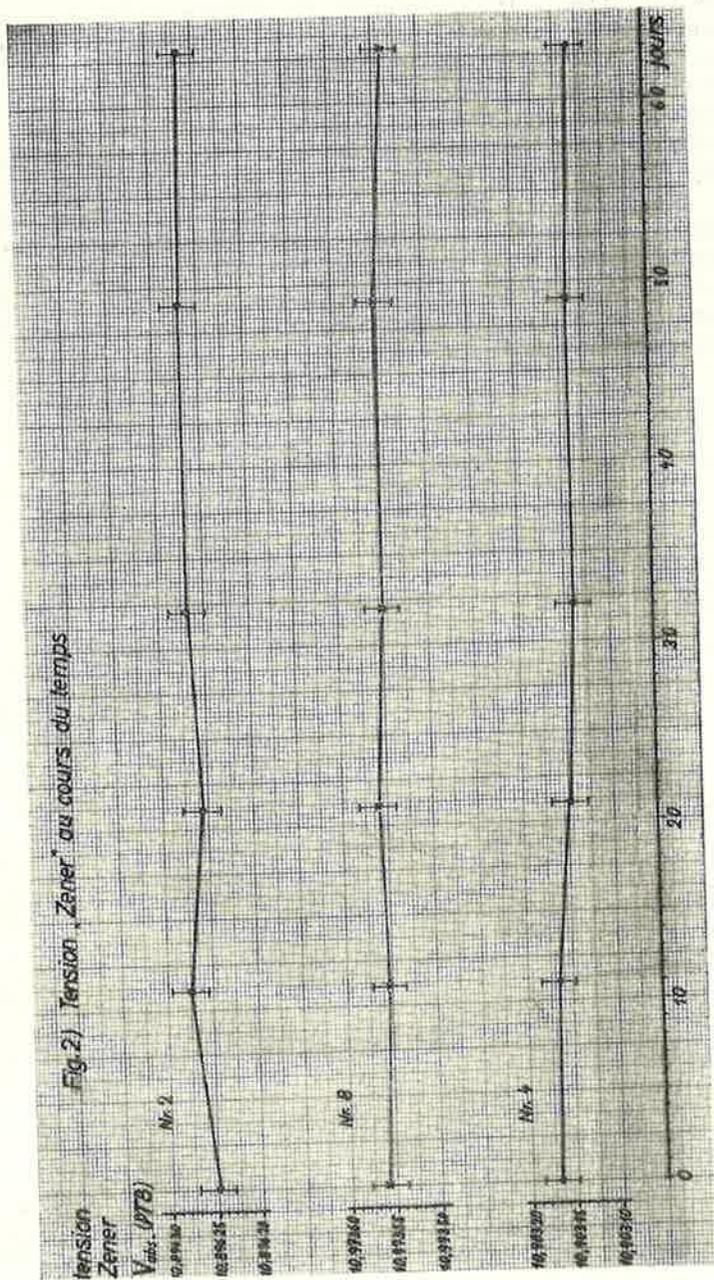


Fig. 1. — Schéma des circuits pour la mesure précise des tensions « Zener », (Exemple d'une « tension Zener » d'environ 11 V pour un courant de 14 mA.)

DZ, diode Zener; E, élément étalon; G, galvanomètre; PF, potentiomètre Feussner; CE, comparateur des éléments étalons; GP, groupe primaire de la force électromotrice.

1, circuit contenant la diode Zener; 2, dispositif pour le réglage et le contrôle du courant; 3, potentiomètre et éléments étalons pour la mesure de la tension Zener; 4, circuit du courant auxiliaire pour le potentiomètre Feussner; 5, circuit pour le contrôle du courant auxiliaire; 6, circuit du comparateur pour la mesure des éléments étalons.

Au cours de deux mois, 3 diodes ont montré une variation (fig. 2) qui ne dépassait pas l'incertitude relative des mesures, c'est-à-dire  $2 \times 10^{-6}$ . Pour les 7 autres diodes, la variation relative ne dépassait pas  $5 \times 10^{-6}$  pour deux d'entre elles,  $10 \times 10^{-6}$  pour 4 autres et  $20 \times 10^{-6}$  pour la dernière.



Intensité du courant : 14 mA;  $t$  ambiante du pétrole : 23°C pendant les mesures, 20°C entre les mesures.

En conséquence de ces résultats, on projette de comparer le groupe primaire d'éléments étalons avec un groupe de diodes Zener ou de combinaisons de diodes pendant plusieurs années. Peut-être sera-t-il possible de contrôler plus tard la stabilité de la tension électrique par une méthode supplémentaire à l'aide de diodes Zener. Si l'on considère la tension plus élevée des diodes, la possibilité de les alimenter par un courant extérieur et leur insensibilité aux influences mécaniques et thermiques du transport, il en résulte quelques avantages qui font défaut aux éléments étalons. C'est pourquoi on pourrait envisager l'usage des diodes Zener comme étalons voyageurs pour la comparaison des unités de tension entre les laboratoires, peut-être même pour les comparaisons internationales.

(5 octobre 1961)

PROPOSITIONS AU COMITÉ CONSULTATIF

ELECTROTECHNICAL LABORATORY (Japon)

1. Comparaisons internationales de résistances étalons autres que celles de  $1 \Omega$ .

L'Electrotechnical Laboratory propose la comparaison internationale de résistances étalons autres que les résistances de  $1 \Omega$ , ceci étant considéré comme très utile pour les raisons suivantes :

a. Dans la méthode actuelle de mesure des résistances, la précision des comparaisons de résistances de  $10$  à  $1000 \Omega$  est meilleure que celle des comparaisons de résistances de  $1 \Omega$ , sauf si l'on considère la stabilité.

b. La méthode d'établissement d'une échelle de résistances est différente dans chaque Laboratoire national, de sorte que la vérification du rapport  $10$  peut être effectuée par cette comparaison et l'erreur systématique qui existe sur ce rapport entre les Laboratoires nationaux peut être élucidée.

c. Lorsque de nombreuses résistances étalons de valeurs élevées sont employées dans la mesure absolue de l'ohm, les erreurs systématiques dues aux erreurs de l'échelle de résistances peuvent être recherchées par cette comparaison.

d. Si les résistances de valeurs élevées pouvaient être réalisées avec une stabilité d'un ordre de grandeur égal ou supérieur à celle des résistances de  $1 \Omega$ , on pourrait étudier à nouveau si la conservation de l'unité de résistance au moyen de résistances de  $1 \Omega$  est la plus appropriée.

Ainsi, il est souhaitable que cette comparaison soit effectuée au Bureau International des Poids et Mesures en même temps que celle des résistances de  $1 \Omega$ . Des résistances de  $10$  ou  $100 \Omega$  conviendraient pour cette comparaison.

Il est également souhaitable que chaque laboratoire construise des résistances stables et envoie toujours les mêmes résistances au Bureau International afin que soit estimée leur stabilité.

(23 août 1961)

2. *Comparaisons internationales d'étalons de capacité.*

La comparaison internationale circulaire d'étalons de capacité dans les Laboratoires nationaux s'étend sur une longue période.

Tout effort devrait donc être fait pour réduire la durée des mesures dans chaque Laboratoire national. Sinon, le but de cette comparaison risque de ne pas être atteint, puisque la stabilité des condensateurs n'est pas nécessairement satisfaisante pour une aussi longue période.

Si, dans l'avenir, une telle comparaison s'impose de nouveau, il sera nécessaire qu'elle soit centralisée.

(23 août 1961)

3. *Extension des activités du Comité Consultatif au domaine des hautes fréquences et des micro-ondes, et organisation de comparaisons internationales.*

Les récents progrès dans les techniques des hautes fréquences et des micro-ondes rendent nécessaires l'établissement d'étalons nationaux sûrs et l'unification internationale de ces étalons. Il est par suite désirable d'étendre à l'avenir les travaux du Comité Consultatif à ce domaine, alors qu'ils sont actuellement limités au courant continu et aux basses fréquences.

Compte tenu de cette situation, il est désirable que le Comité Consultatif prenne l'initiative d'entreprendre la comparaison et l'unification internationales des grandeurs dans le domaine des hautes fréquences et des micro-ondes.

Afin de stimuler ce programme, le Comité Consultatif devrait coopérer plus intimement avec les organisations scientifiques internationales, telles que l'Union Radioscopique Internationale (U. R. S. I.), l'Union Astronomique Internationale, etc.

(Septembre 1961)

INSTITUT DE MÉTROLOGIE D. I. MENDÉLÉEV (U. R. S. S.)

*Sur le programme des déterminations absolues de la résistance et de la force électromotrice.*

a. Les Laboratoires métrologiques nationaux qui disposent des installations pour les mesures absolues de la résistance et de la

force électromotrice et qui désirent participer à ce travail, sélectionnent chacun deux bobines de résistance de  $1 \Omega$  et deux piles étalons, suffisamment étudiées.

b. On envoie à la date fixée tous les étalons sélectionnés au Laboratoire national qui, d'après le programme approuvé par le Comité Consultatif, effectuera le premier les déterminations absolues.

c. On effectue les déterminations absolues des valeurs des étalons sélectionnés, qui sont ensuite envoyés au laboratoire suivant. Un délai de deux mois est fixé à chaque laboratoire pour faire les déterminations absolues.

d. Les déterminations absolues doivent être commencées dans le premier trimestre de 1963.

e. On communique les résultats des déterminations absolues aux autres laboratoires internationaux participant à ce travail, ainsi qu'au Bureau International. Après l'achèvement des déterminations absolues, les étalons sont envoyés au Bureau International pour les comparer avec les groupes de référence conservés au Bureau.

f. On constitue une commission des représentants des Laboratoires nationaux participant aux comparaisons; cette commission est chargée de préparer pour le Comité Consultatif le rapport sur les résultats du travail.

(Proposition distribuée en séance le 5 octobre 1961)

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS (États-Unis d'Amérique)

#### *Comparaisons internationales d'étalons de capacité.*

Les résultats actuels de la comparaison internationale des étalons de capacité sont décevants. D'importantes variations se sont produites durant les transports des instruments, comme en témoignent les mesures faites avant et après par les laboratoires d'origine.

Ces dernières années, de nouvelles méthodes, dues à l'origine à A. M. Thompson (1) et à ses collègues du National Standards Laboratory d'Australie, ont rendu possible la mesure précise et fidèle des condensateurs à trois bornes de faible valeur. On peut construire de petits condensateurs à trois bornes beaucoup plus

---

(1) THOMPSON (A. M.), The precise measurement of small capacitances, *I. R. E. Trans. on Instr.*, 1-7, nos 3-4, dec. 1958, p. 245-253.

stables et robustes que les grands condensateurs au mica. Nous avons fabriqué plusieurs condensateurs d'environ 10 pF chacun, du type à trois bornes, qui conviendraient bien pour des comparaisons internationales. Chacun se compose d'un simple disque en silice fondue dont les deux faces sont recouvertes d'un dépôt métallique. La capacité est déterminée, en valeur absolue, à quelques millièmes près par comparaison avec un condensateur calculable du type déjà décrit<sup>(2)</sup>.

Nous proposons que ces condensateurs, ainsi que les autres instruments appropriés à trois bornes qui pourraient être proposés, soient mis en circulation entre les laboratoires pour permettre une comparaison des mesures de capacité. Nous serions disposés à remesurer tous les condensateurs avant et après chaque détermination effectuée par un Laboratoire national. Toute variation en cours de transport de plus de  $1 \times 10^{-6}$  pourrait ainsi être mise en évidence avant que les condensateurs parviennent au laboratoire suivant.

Comme chaque nouvelle série de mesures de ces condensateurs pourrait être faite en une ou deux semaines, les comparaisons pourraient se poursuivre aussi rapidement que le permettrait la mise au point de l'appareillage de mesure approprié dans les autres laboratoires<sup>(3)</sup>.

(Proposition envoyée aux Membres  
du Comité Consultatif le 15 janvier 1962)

---

<sup>(2)</sup> LAMPARD (D. G.), A new theorem in electrostatics with application to calculable standards of capacitance, *Instn. Electr. Engrs.*, Monograph n° 216 M, jan. 1957, 10 pages.

THOMPSON (A. M.), The cylindrical cross-capacitor as a calculable standard, *Proc. Instn. Electr. Engrs.*, 106-B, n° 27, may 1959, p. 307-310.

LAMPARD (D. G.), Some results on the cross-capacitances per unit length of cylindrical three-terminal capacitors with thin dielectric films on their electrodes, *Instn. Electr. Engrs.*, Monograph n° 351 M, jan. 1960, 8 pages.

CUTKOSKY (R. D.), Evaluation of the NBS unit of resistance based on a computable capacitor, *J. Res. N. B. S.*, 65-A, 1961, p. 147-158.

<sup>(3)</sup> Mc GREGOR (M. C.) *et al.*, New apparatus at the National Bureau of Standards for absolute capacitance measurement, *I. R. E. Trans. on Instr.*, I-7, n°s 3-4, dec. 1958, p. 253-261.

# TABLE DES MATIÈRES

## COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ

9<sup>e</sup> Session (1961)

	Pages.
NOTE.....	2
Avertissement historique.....	5
Liste des Membres.....	7
Ordre du Jour.....	10
<b>Neuvième Rapport au Comité International des Poids et Mesures,</b> par P. Vigoureux.	
Hommage à la mémoire des Membres décédés (P. de la Gorce et C. Budeanu). Comparaisons 1960-1961 des étalons nationaux de l'ohm et du volt. Déterminations absolues de l'ohm et du volt; proposition de comparaison des résultats de ces détermi- nations. Proposition de comparaisons internationales d'étalons de résistance autres que ceux de 1 $\Omega$ . Progrès sur les matériaux pour résistances étalons. Premiers résultats des comparaisons internationales des étalons de capacité; possibilité d'extension de ces comparaisons à des condensateurs de faible valeur. Mesures récentes du coefficient gyromagnétique du proton; constitution d'un Groupe de travail présidé par Mr Vigoureux. Échange de vues sur la possibilité d'organiser des comparaisons internationales de grandeurs électriques et magnétiques, telles que L, H, $\Phi$ , $tg\delta$ , et sur l'extension de la compétence du Comité Consultatif au domaine des radiofréquences.....	11
<b>Annexes.</b>	
BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES :	
1. <i>Rapport sur les comparaisons des étalons nationaux de résistance électrique (novembre 1960-mars 1961);</i> par G. Leclerc.....	17
2. <i>Rapport sur les comparaisons des étalons nationaux de force électromotrice (décembre 1960-janvier 1961);</i> par G. Leclerc..	26
3. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS (États-Unis d'Amérique). — <i>La conservation des unités électriques au N. B. S.;</i> par R. D. Cutkosky et R. L. Driscoll.....	33

	Pages.
4. ELECTROTECHNICAL LABORATORY (Japon). — <i>Détermination absolue de l'ohm</i> .....	36
5. DEUTSCHES AMT FÜR MESSWESEN (Allemagne). — <i>Réalisation d'une balance de courant</i> ; par D. Bender et W. Schlesok.....	40
6. ELECTROTECHNICAL LABORATORY (Japon). — <i>Récents progrès des recherches sur les matériaux pour résistances électriques</i> ..	45
7. DEUTSCHES AMT FÜR MESSWESEN (Allemagne). — <i>Recherches sur les matériaux pour résistances étalons</i> ; par D. Bender et A. Korn.....	51
8. <i>État des comparaisons internationales des étalons voyageurs de capacité</i> (Mesures à l'I. M. M., au D. A. M. et à la P. T. B.).	53
9. PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (Allemagne). — <i>Détermination fondamentale de l'unité de capacité par rattachement aux unités de résistance et de temps</i> ; par H. E. Linckh, H. Hoyer et F. Brasack.....	59
ELECTROTECHNICAL LABORATORY (Japon) :	
10. <i>Condensateurs étalons pour les comparaisons internationales</i> ....	66
11. <i>État actuel des étalons de capacité de faibles valeurs à l'E. T. L.</i> ..	69
12. INSTITUT DE MÉTROLOGIE D. I. MENDÉLÉEV (U. R. S. S.). — <i>Déterminations absolues du coefficient gyromagnétique du proton dans un champ magnétique faible</i> ; par B. M. Yanovsky et N. V. Stoudentsov.....	72
13. PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (Allemagne). — <i>Détermination absolue du coefficient gyromagnétique du proton</i> ; par R. Ochsenfeld et H. Capptuller.....	85
14. ELECTROTECHNICAL LABORATORY (Japon). — <i>État actuel de la mesure de <math>\gamma_p</math> à l'E. T. L. (pour son utilisation comme étalon d'intensité)</i> .....	90
15. NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (Royaume-Uni). — <i>Note sur la détermination du coefficient gyromagnétique du proton</i> ; par P. Vigoureux.....	93
16. ISTITUTO ELETTEOTECNICO NAZIONALE GALILEO FERRARIS (Italie). — <i>Équilibrage du pont de Maxwell dans la comparaison entre étalons d'inductance et de capacité</i> ; par C. Chiodi.....	94
17. PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (Allemagne). — <i>Tensions de référence produites à l'aide de diodes Zener</i> ; par W. Hetzel et F. Melchert.....	97
18. <i>Propositions au Comité Consultatif, présentées par l'E. T. L., l'I. M. M. et le N. B. S.</i> .....	101

IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS & C<sup>ie</sup>  
55, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 55 — PARIS

---

161 654

---

Dépôt légal, Imprimeur, 1962, n° 1547  
Dépôt légal, Éditeur, 1962, n° 1101

ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 20 MARS 1963

Imprimé en France.

THE UNIVERSITY OF CHICAGO  
LIBRARY  
540 EAST 57TH STREET  
CHICAGO, ILL. 60637