

COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ
SESSION DE 1965



COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

COMITÉ CONSULTATIF
D'ÉLECTRICITÉ

11^e SESSION — 1965

(10-12 mai)



PARIS
GAUTHIER-VILLARS

ÉDITEUR DU BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

55, Quai des Grands-Augustins.



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 ⁽¹⁾.

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.

Le Comité International est composé de dix-huit membres appartenant à des États différents; il se réunit au moins une fois 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.

Limitées à l'origine aux mesures de longueur et de masse et aux études métrologiques en relation avec ces grandeurs, les activités du Bureau International ont été étendues aux étalons de mesure électriques (1927), photométriques (1937) et des radiations ionisantes (1960). Dans ce but, un agrandissement des premiers laboratoires construits en 1876-1878 a eu lieu en 1929 et deux nouveaux bâtiments ont été construits en 1963-1964 pour les laboratoires de la Section des radiations ionisantes.

⁽¹⁾ Au 31 décembre 1965, quarante États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, 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, République Arabe Unie, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Vénézuéla, Yougoslavie.

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 ont un règlement commun (*Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 31, 1963, p. 97). Chaque Comité Consultatif, dont la présidence est généralement confiée à un membre du Comité International, est composé d'un délégué des grands Laboratoires de métrologie et des Instituts spécialisés dont la liste est établie par le Comité International, ainsi que de membres individuels désignés également par le Comité International. Ces Comités tiennent leurs sessions à des intervalles irréguliers; ils sont actuellement au nombre de sept :

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.
7. Le Comité Consultatif des Unités, créé en 1964.

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*.

Depuis 1965 le journal international *Metrologia*, édité sous les auspices du Comité International des Poids et Mesures, publie des articles sur les principaux travaux de métrologie scientifique effectués dans le monde, sur l'amélioration des méthodes de mesure et des étalons, sur les unités, etc., ainsi que des rapports concernant les activités, les décisions et les recommandations des divers organismes issus de la Convention du Mètre.

Comité International des Poids et Mesures

Secrétaire
J. DE BOER

Vice-Président
J. M. OTERO

Président
L. E. HOWLETT

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ

Président

G. D. BOURDOUN, Membre du Comité International des Poids et Mesures;
Directeur de la Chaire de Métrologie, Comité National des Normes,
des Mesures et Instruments de Mesure de l'U.R.S.S., *Moscou* V 49.

Membres

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [P.T.B.], *Braunschweig*
(H. E. LINCKH, Directeur de l'Abteilung II).

DEUTSCHES AMT FÜR MESSWESEN UND WARENPRÜFUNG [D.A.M.W.],
Berlin (W. KEMNITZ, Vizoprésident; M. KALAU, Arbeitsgebietsleiter).

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

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES [N.R.C.], *Ottawa* (J. T. HENDERSON,
Head, Electricity Section, Division of Applied Physics).

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

ELECTROTECHNICAL LABORATORY [E.T.L.], *Tokyo* (Y. INOUE, Chief,
Standards Division).

INSTITUT DE MÉTROLOGIE D.I. MENDÉLÉEV [I.M.M.], *Leningrad*
(E. TCHERNICHOV, Chef de la Section électromagnétique).

ISTITUTO ELETTEOTECNICO NAZIONALE GALILEO FERRARIS [I.E.N.],
Torino (P. LOMBARDI, Co-directeur).

NATIONAL STANDARDS LABORATORY [N.S.L.], *Chippendale* (W. K. CLOTHIER, Senior Principal Research Scientist, Division of Applied Physics).

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

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

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

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



ORDRE DU JOUR DE LA SESSION

1. Résultats des comparaisons des étalons nationaux de résistance et de force électromotrice.
 2. Déterminations absolues. Valeurs, en unités absolues, des étalons en dépôt au B.I.P.M.
 3. Amélioration de la stabilité des éléments Weston.
 4. Comparaison internationale des étalons de capacité au mica de 0,1 μ F.
 5. Proposition de comparaison internationale d'étalons de capacité de faibles valeurs.
 6. Examen des possibilités de comparaison internationale d'étalons d'inductance.
 7. Utilisation de diodes de Zener comme étalons de tension transportables. Choix d'une même tension par tous les laboratoires pour permettre l'exécution de comparaisons internationales.
 8. Étalons de transfert pour le passage du courant continu au courant alternatif.
 9. Rapport du Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences.
 10. Questions diverses.
-

41^e SESSION (1965)

RAPPORT

AU

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Par P. VIGOUREUX, Rapporteur

Le Comité Consultatif d'Électricité s'est réuni pour sa onzième session au Bureau International des Poids et Mesures, à Sèvres, où il a tenu quatre séances les 10, 11 et 12 mai 1965.

Étaient présents : Mr BOURDOUN, président; MM. CLOTHIER, ELNÉ-KAVÉ, HENDERSON, HÉROU, INOUE, LINCKH, LOMBARDI, OLMER, PAGE, TCHERNICHOV, TERRIEN, VIGOUREUX, YOVANOVITCH.

Assistaient aussi aux séances : Mr ASTIN, membre du Comité International des Poids et Mesures. MM. LECLERC et SAKUMA (Bureau International), invités.

Excusé : Mr KÖNIG.

Empêchés : MM. KALAU et KEMNITZ.

Le Président souhaite la bienvenue à tous les participants; puis il note l'intérêt des sujets inscrits à l'Ordre du Jour qui est adopté après une courte discussion.

Mr Vigoureux (assisté de Mr Leclerc comme secrétaire) est nommé rapporteur.

Comparaisons des étalons nationaux de résistance et de force électromotrice

(Annexes 1, 2)

Mr Leclerc commente les résultats des comparaisons des étalons nationaux de résistance et de force électromotrice effectuées au Bureau International en 1963-1964. Ces résultats montrent :

1^o une excellente stabilité relative des « unités » conservées dans les laboratoires nationaux, tant pour la résistance que pour la force électromotrice;

2^o que les comparaisons périodiques ont atteint leur but puisqu'elles permettent d'assurer une coordination internationale au millionième près.

Le Comité Consultatif félicite Mr Leclerc d'avoir mené à bien ce travail important.

Mr Tchernichov offre de déposer au B.I.P.M. un des étalons de résistance de l'I.M.M. dont les dernières comparaisons internationales ont démontré la stabilité. Le directeur du Bureau l'en remercie et signale le grand intérêt que présentent pour le B.I.P.M. les dépôts d'étalons de premier ordre faits par les laboratoires nationaux, en particulier ceux d'éléments Weston. Le B.I.P.M. désirerait en effet constituer une réserve de piles étalons lui permettant de pallier à tout moment les défaillances de celles qui conservent son unité de force électromotrice.

**Déterminations absolues. Valeurs, en unités absolues,
des étalons en dépôt au Bureau International**

(Annexes 3, 4, 5, 6)

Les résultats des comparaisons mentionnés ci-dessus, combinés avec ceux des mesures absolues faites par les laboratoires nationaux, permettent de rapporter les « unités » conservées par le B.I.P.M. aux unités absolues.

Pour l'ohm on obtient le tableau suivant :

Détermination absolue	$(\Omega_{\text{BIPM}} - \Omega) \times 10^6$
NRC (1957)	— 3,4
NBS (1960)	+ 0,85
ETL (1964)	+ 1,3
NSL (1964)	— 0,05
NPL (1964)	— 0,9

On constate que l'ohm conservé par le B.I.P.M. ne diffère guère de plus de 1×10^{-6} de l'ohm absolu.

D'autre part, il ressort des déterminations effectuées par le N.B.S. et le N.P.L. au moyen de balances de courant que l'ampère du B.I.P.M. excède d'environ 11×10^{-6} l'ampère absolu. L'erreur probable de cette valeur ne semble pas devoir dépasser 3×10^{-6} .

Sur la proposition de Mr Page, le Comité Consultatif exprime le vœu que l'ampère soit déterminé indépendamment au moyen de balances de courant ou d'électrodynamomètres de types divers par tous les laboratoires capables d'effectuer de telles déterminations.

Mr Page fait aussi remarquer qu'il serait souhaitable que l'on entreprenne la détermination du volt au moyen d'électromètres afin de pouvoir étalonner directement les éléments Weston.

Amélioration de la stabilité des éléments Weston

Le Comité Consultatif constate l'intérêt des nombreux rapports présentés sur les méthodes de fabrication des éléments Weston et prie le L.C.I.E. d'en faire une synthèse qu'il présentera à la prochaine session. Mr Olmer, directeur du L.C.I.E., accepte d'assumer cette tâche.

Le Président exprime le vœu que les laboratoires continuent leurs recherches et en communiquent périodiquement les résultats au B.I.P.M.

Comparaison internationale des étalons de capacité au mica de 0,1 μ F

(*Annexes 7, 8, 9*)

Mr Tchernichov présente les résultats définitifs du premier circuit de comparaisons des étalons de capacité au mica d'environ 0,1 μ F. Mr Henderson félicite l'I.M.M. du soin avec lequel ces mesures ont été faites.

Le Comité Consultatif approuve les dispositions envisagées pour le second circuit des comparaisons et il est d'accord pour exclure de cette seconde partie les condensateurs N^{os} 22, 4886 et 4888 qui se sont montrés trop instables. Sur la demande de Mr Lombardi, l'I.E.N. de Turin sera inclus dans ce second circuit.

Proposition de comparaison internationale d'étalons de capacité de faibles valeurs

(*Annexe 10*)

Mr Clothier résume les résultats excellents, tant pour la précision de la détermination en valeur absolue que pour la stabilité, déjà obtenus au N.S.L. avec des condensateurs de capacités comprises entre 0,25 et 5 000 pF. Les recherches se poursuivent et bien que le N.S.L. n'ait pas encore fabriqué de condensateurs de faibles valeurs spécialement destinés aux comparaisons internationales, des condensateurs construits pour son propre usage ont fait preuve d'une grande stabilité.

Mr Page annonce que le N.B.S. étudie la construction d'un condensateur du type Thompson-Lampard dans lequel la longueur utile sera mesurée par une méthode interférentielle.

Le N.B.S. dispose de condensateurs de 10 pF de stabilité éprouvée, dont quelques-uns d'ailleurs ont déjà été étudiés dans d'autres laboratoires, et il est prêt à les engager dans des comparaisons internationales.

Une discussion s'engage sur le moyen d'appliquer la Recommandation E 4, paragraphe 2^o, faite par le Comité Consultatif en 1963. Il en ressort que le N.S.L., le N.B.S., l'I.M.M., le N.P.L. et le N.R.C. ont

déjà commencé des comparaisons et que le L.C.I.E., l'E.T.L. et la P.T.B. pourraient y prendre part dans un avenir proche. Le B.I.P.M. se chargera d'organiser ces comparaisons.

Si d'autres laboratoires désirent y participer, ils devront en faire officiellement la demande au B.I.P.M.

Le directeur du Bureau International constate que les comparaisons envisagées de condensateurs très bien déterminés en valeur absolue ont une importance aussi grande que celles des étalons nationaux de résistance et de force électromotrice; il pense donc que le B.I.P.M. doit jouer un rôle actif dans de telles comparaisons.

Mr Astin en est convaincu et juge nécessaire de recommander au Comité International de prendre des décisions dans ce sens. Après discussion, le Comité Consultatif décide de demander au Comité International des Poids et Mesures de fournir au B.I.P.M. les moyens de participer à une comparaison internationale de condensateurs de valeurs comprises entre 1 à 10 pF.

Le Comité Consultatif tient enfin à féliciter le N.S.L. pour l'invention et la mise au point du type de condensateur calculable qui a fourni une méthode nouvelle si précise pour la détermination des unités électriques.

Examen des possibilités de comparaison internationale d'étalons d'inductance

(Annexes 11, 12)

Le Comité Consultatif prend note avec intérêt des travaux de l'I.E.N. sur les étalons d'inductance et du résultat de la comparaison d'un étalon d'inductance mutuelle entre le N.R.C. et le N.P.L. Cependant, après discussion, il ne juge pas opportun l'organisation par le B.I.P.M. de comparaison internationale d'étalons d'inductance.

Utilisation de diodes de Zener comme étalons de tension transportables

(Annexes 13, 14, 15)

Mr Linckh donne le résultat d'un premier essai de comparaison des unités de force électromotrice conservées par la P.T.B. et le B.I.P.M. au moyen d'un dispositif à diodes de Zener réalisé à la P.T.B. conformément au modèle décrit dans *Comité Consultatif d'Électricité*, 10^e session, 1963, p. 23.

De son côté, Mr Tchernichov a déjà obtenu des résultats prometteurs quant à la stabilité de la tension de sortie de diodes de Zener et il pense que l'échange de diodes entre laboratoires serait intéressant.

Mr Page est de l'avis de Mr Tchernichov mais précise que pour l'ins-

tant il envisage seulement l'échange de diodes de Zener nues, à l'exclusion de dispositifs plus complets du type de celui mis au point par la P.T.B.

Le Comité Consultatif reconnaît l'utilité de tels échanges mais décide que, pour le moment, ils s'effectueront entre les laboratoires, sans l'intermédiaire du B.I.P.M., puisqu'il s'agit davantage d'étudier la stabilité des diodes que leur emploi comme dispositifs de comparaison des forces électromotrices.

Le Comité Consultatif considère de plus qu'il serait prématuré d'imposer dès maintenant une valeur normalisée pour la tension de sortie des diodes en vue, par exemple, de comparaisons internationales.

Étalons de transfert pour le passage du courant continu au courant alternatif

(Annexe 16)

Mr Page constate que s'il a été effectué de nombreuses comparaisons des grandeurs électriques en courant continu, à cause des moyens excellents qui permettent de les faire, il n'y a pas eu jusqu'à présent de comparaisons de ces mêmes grandeurs en courant alternatif malgré l'importance qu'elles présentent.

Le N.B.S. possède maintenant des instruments adéquats pour faire ces comparaisons; ils sont petits, légers, robustes, facilement transportables et Mr Page offre de les envoyer aux laboratoires qui le souhaiteraient. Ces instruments permettent d'effectuer :

- 1° des comparaisons de tensions alternatives;
- 2° le passage courant continu — courant alternatif;
- 3° l'étude du comportement des appareils en fonction de la fréquence.

Le Comité Consultatif unanime encourage l'échange de ces instruments par entente directe entre les laboratoires intéressés.

Examen du rapport du Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences

Mr Bourdoun présente au Comité Consultatif, pour examen, le rapport de ce Groupe de travail qui s'est réuni sous sa présidence les 6 et 7 mai 1965 (voir p. E 16).

Mr Astin exprime ses remerciements au Groupe de travail pour la qualité de son rapport. Le Comité Consultatif approuve le programme proposé et décide d'en recommander l'exécution au Comité International des Poids et Mesures.

Mr Astin souhaiterait que le Bureau International des Poids et Mesures puisse participer aux mesures. Il sait que cela ne sera pas possible pour les

comparaisons envisagées dans ce rapport, mais il voudrait que le Comité International prenne des dispositions pour l'avenir.

Après une courte discussion la recommandation suivante est adoptée à l'unanimité.

RECOMMANDATION E 1

Le Comité Consultatif d'Électricité ayant examiné à sa 11^e session le rapport de son Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences, approuve le programme de comparaisons exposé dans ce rapport et invite les laboratoires pilotes à entreprendre immédiatement l'organisation de ces comparaisons.

Il est d'avis que l'on devrait envisager dès maintenant la possibilité d'une participation active du Bureau International des Poids et Mesures à la coordination et au développement de la métrologie des grandeurs aux radiofréquences, avec le personnel compétent et le matériel approprié, et que cette action serait utile même si les moyens mis en œuvre au Bureau International étaient, dans un premier stade, limités à une importance modeste.

Questions diverses

Mr Yovanovitch déplore un manque d'uniformité dans la notation des fréquences, tant électriques que mécaniques. Le Président pense que cette question serait plutôt de la compétence du Comité Consultatif des Unités.

Mr Henderson signale à l'attention du Comité Consultatif le très important rapport sur la détermination du coefficient gyromagnétique du proton effectuée à l'E.T.L. Il est convenu que ce rapport sera discuté lors de la prochaine réunion du Groupe de travail spécialisé.

Le Président remercie les délégués de leur active participation aux discussions, puis Mr Yovanovitch se fait l'interprète de tous pour féliciter Mr Bourdoun de la manière dont il a conduit les délibérations.

(Sèvres, 12 mai 1965)

Appendice

Rapport du Groupe de travail pour la mesure des grandeurs électriques dans le domaine des hautes fréquences, des ultra-hautes fréquences et des hyperfréquences

Le Groupe de travail s'est réuni au Pavillon de Breteuil à Sèvres, les 6 et 7 mai 1965.

Étaient présents : MM. G. D. BOURDOUN, président ; J. BLOUET (L.C.I.E. et Com. Électrotechnique Intern.), B. DECAUX (U.R.S.I.), C. EGIDI (I.E.N.), L. ESSEN (N.P.L.), I. A. HARRIS (Electrical Inspection Directorate Lab., Ministry of Aviation, Royaume-Uni), J. T. HENDERSON (N.R.C.), H. HOYER (P.T.B.), Y. INOUE (E.T.L.), M. C. SELBY (N. B. S., Boulder), E. TCHERNICHOV (I.M.M.).

Assistaient aussi à la réunion : MM. J. TERRIEN, directeur du Bureau International des Poids et Mesures, G. LECLERC et A. SAKUMA (B.I.P.M.).

Excusés : Mr G. ALMASSY de l'Institut de Recherches des Télécommunications de Hongrie; les représentants du National Standards Laboratory (Chippendale) et de l'Union Internationale des Télécommunications (Genève).

Empêchés : MM. W. KEMNITZ et M. KALAU du D.A.M.W.

Absents : Les représentants de l'Institut Radiotechnique de Tchécoslovaquie (Prague) et de la Radio Research Station (Slough).

Ayant entendu l'exposé sur les comparaisons organisées par l'U.R.S.I. et recueilli les avis des membres présents, le Groupe de travail considère que les conditions requises sont satisfaites dès maintenant pour l'organisation des comparaisons internationales suivantes :

a. une comparaison d'instruments de mesure des faibles puissances à la fréquence de 10 GHz; cette comparaison pourrait commencer à la fin de 1965 ou au début de 1966, avec la participation des laboratoires suivants : E.T.L. (Tokyo), I.M.M. (Leningrad), D.A.M.W. (Berlin), Institut de Recherches des Télécommunications (Budapest), N.B.S. (Boulder);

b. une deuxième comparaison semblable commençant à la fin de 1966 ou au début de 1967 avec la participation de l'I.M.M. (Leningrad), de l'E.T.L. (Tokyo), du L.C.I.E. (Fontenay-aux-Roses), du N.R.C. (Ottawa), du N.S.L. (Chippendale), de la P.T.B. (Braunschweig) et de l'I.E.N. (Turin);

c. une comparaison d'instruments de mesure des faibles puissances à la fréquence de 3 GHz; cette comparaison pourrait commencer à la fin de 1965 ou au début de 1966, avec la participation des laboratoires suivants : I.M.M. (Leningrad), N.P.L. (Teddington), N.B.S. (Boulder), N.R.C. (Ottawa), D.A.M.W. (Berlin);

d. des mesures comparatives de paramètres diélectriques à la fréquence de 10 GHz, qui commenceraient à la fin de 1965 ou au début de 1966, avec la participation des laboratoires suivants : I.M.M. (Leningrad), N.P.L. (Teddington), N.B.S. (Boulder), N.R.C. (Ottawa).

On propose que chacune de ces comparaisons soit du type circulaire, c'est-à-dire que les instruments sont envoyés successivement aux laboratoires participants. Pour chacune de ces comparaisons l'un des laboratoires ou instituts participants serait désigné comme *laboratoire pilote*, à savoir :

- comparaison a : Electrotechnical Laboratory (Tokyo),
- comparaison b : Institut de Métrologie D. I. Mendéléev (Leningrad),
- comparaison c : National Bureau of Standards (Boulder),
- comparaison d : National Physical Laboratory (Teddington).

Le laboratoire pilote aurait la mission de régler les questions d'organisation et les questions techniques, en accord avec les autres participants, pour la bonne marche des comparaisons et la présentation des résultats sous une forme unifiée. Le laboratoire pilote serait chargé de rassembler les résultats des mesures et de rédiger un rapport à la fin du cycle des comparaisons.

Le Bureau International devrait être tenu informé de toute la correspondance officielle, soit en servant d'intermédiaire, soit en recevant des copies des lettres échangées. Il ferait en sorte que le Groupe de travail, les laboratoires participants et le président de la Commission N° 1 de l'U.R.S.I. reçoivent la documentation qu'ils désirent au sujet des comparaisons en cours. Le Bureau International se chargerait de la diffusion du rapport final de chaque comparaison et, le cas échéant, de sa publication imprimée. Si le nombre des laboratoires participants à une comparaison est trop grand pour qu'une comparaison circulaire puisse être achevée dans un délai raisonnable, les laboratoires participants seraient répartis en plusieurs groupes ayant en commun le laboratoire pilote. Dans le cas particulier des comparaisons a et b les deux laboratoires pilotes (Electrotechnical Laboratory et Institut de Métrologie D. I. Mendéléev) seraient inclus dans tous les groupes de comparaison.

Chacun des laboratoires participants devrait, de préférence, fournir des instruments ou des éprouvettes à employer dans les comparaisons.

En dehors des laboratoires cités comme participant aux comparaisons a, b, c et d, ceux qui désireraient à l'avenir participer à de telles comparaisons pourront en informer le Bureau International en indiquant les paramètres des instruments à considérer, la précision souhaitée, etc., ainsi que le nom et l'adresse de la personne responsable; le Bureau International agira en conséquence.

Le Groupe de travail a remis à plus tard l'étude des propositions qui lui ont été faites concernant l'étalonnage de wattmètres à micro-ondes et des mesures comparatives d'atténuation.

Il signale au Comité Consultatif d'Électricité l'intérêt des mesures de capacité électrique aux fréquences comprises entre 0,1 et 1 MHz.

Le Groupe de travail a prié son président d'assurer la liaison entre ce Groupe et la Commission N° 1 de l'U.R.S.I.

Désirant raccourcir le nom qui lui a été donné, le Groupe de travail propose *Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences* (Working group on radiofrequency quantities).

Il souhaite que lors de ses sessions futures, les documents de travail soient reçus à temps pour être étudiés utilement avant la réunion.

ANNEXE 1

Rapport sur la 10^e comparaison des étalons nationaux de résistance électrique

(décembre 1963 — mars 1964)

Par G. LECLERC

Bureau International des Poids et Mesures

Cette comparaison a été la plus importante qui ait eu lieu jusqu'à présent, tant par le nombre des laboratoires participants que par celui des étalons. En effet les dix laboratoires nationaux invités étaient représentés et ont envoyé au Bureau International vingt-six étalons de 1 Ω (tableau I).

Tous les étalons rassemblés à Sèvres étaient du type « à quatre bornes » et presque tous de la plus haute qualité : élément résistant enfermé dans un boîtier métallique rigoureusement étanche rempli d'huile ou de gaz. A l'exception de l'étalon N° 205/57 constitué d'un enroulement en alliage or-chrome, tous étaient en manganine; leur coefficient de température, en général faible, était bien connu. Pendant toute la durée de leur séjour au Bureau International les étalons ont été gardés dans un bain d'huile de paraffine maintenu à $20 \pm 0,2$ °C.

Comme d'habitude, les comparaisons ont été effectuées par la méthode de « substitution » au moyen de notre pont double (*fig. 1*). Grâce aux améliorations de détails apportées depuis dix ans, ce pont est devenu un instrument extrêmement pratique et sûr. Il nous a permis d'effectuer dans un temps raisonnable et avec la précision souhaitée (10^{-7} pour une intensité de courant traversant les étalons de 0,1 A) les 198 séries de comparaisons auxquelles conduit le schéma de mesure décrit ci-après, chaque équilibrage comportant les trois ajustages exigés par la théorie.

TABLEAU I

Liste des étalons de résistance ayant participé
à la comparaison 1963-1964

Laboratoires	Étalons Nos	Arrivée B.I.P.M.	Départ B.I.P.M.	Mode de transport
D. A. M. W. (Allemagne Zone Est)	D-7 205/57	5 décembre 1963	26 novembre 1964	aller: par avion non accompagnés. retour: par avion accompagnés.
P. T. B. (Allemagne Zone Ouest)	1106820 1106822	7 novembre 1963	25 septembre 1964	aller et retour par la route, accompagnés.
N. B. S. (États-Unis d'Amérique)	72 73	11 septembre 1963	4 juin 1964	aller et retour par avion, accompagnés.
N. S. L. (Australie)	S. 4445 S. 4448 S. 41696 S. 41697	13 novembre 1963	8 juin 1964	aller et retour par avion, non accompagnés.
N. R. C. (Canada)	1029331 1336435 1336436 1336437	15 novembre 1963	12 mai 1964	aller et retour par avion, non accompagnés.
L. C. I. E. (France)	638719 3961 1541398	2 décembre 1963	21 avril 1964	aller et retour par la route, accompagnés.
I. E. N. (Italie)	755522 1527396	21 novembre 1963	29 avril 1964	aller et retour par le train, non accompagnés.
E. T. L. (Japon)	5796 31002 34054	31 octobre 1963	21 avril 1964	aller et retour par avion, non accompagnés.
N. P. L. (Royaume-Uni)	713 716	30 septembre 1963	22 avril 1964	aller et retour par avion, accompagnés.
I. M. M. (U. R. S. S.)	922 962	29 septembre 1963	29 avril 1964	aller et retour par avion, accompagnés.
B. I. P. M.	86 722 34052			

SCHÉMA DE MESURE

Reprenant, à très peu près, le schéma de mesure que nous avons utilisé en 1961, nous avons d'abord constitué un premier groupe d'étalons (groupe principal) en prenant un étalon de chaque laboratoire national (celui que nous pensions être le plus stable dans le temps) et un étalon du Bureau International. Les onze étalons ainsi rassemblés ont été comparés deux à deux dans toutes les combinaisons possibles (fig. 2). Les 55 séries « aller » ont été effectuées du 17 décembre 1963 au 3 janvier 1964 à une température moyenne de 20,002 °C et les 55 séries « retour » du 21 février au 6 mars 1964, à une température moyenne de 20,008 °C.

Nous avons ensuite réparti l'ensemble des étalons engagés dans la comparaison internationale (26 étalons voyageurs et 3 étalons du B.I.P.M.) en 12 groupes secondaires constitués chacun en principe de tous les étalons voyageurs d'un même laboratoire et d'un étalon d'origine différente ayant

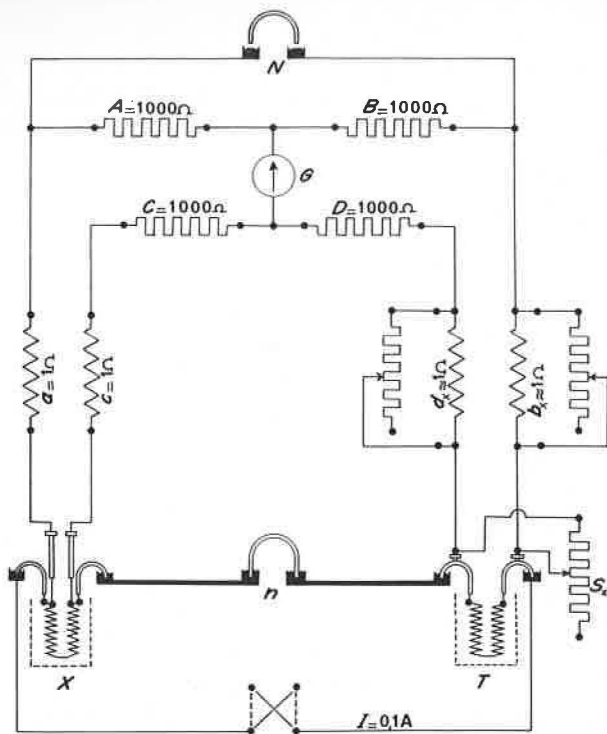


Fig. 1. — Schéma du pont double du Bureau International.
 Lorsque le pont est équilibré simultanément pour les trois montages suivants :

- N ouvert, n fermé (équilibrage principal)
- N fermé, n fermé (— secondaire)
- N ouvert, n ouvert (— tertiaire)

on peut écrire

$$\frac{X}{T_x} = \frac{A}{B} = \frac{a}{b_x} = \frac{C + c}{D + d_x}, \quad \text{avec} \quad T_x = \frac{TS_x}{T + S_x}$$

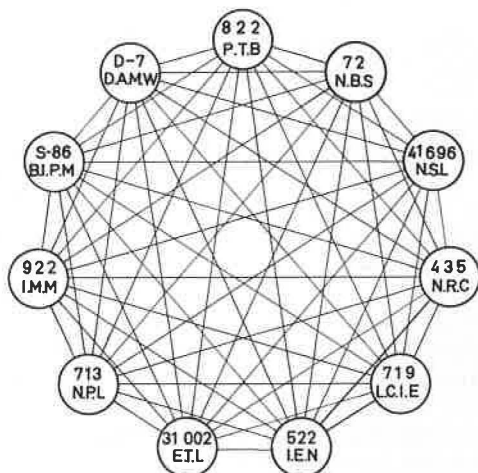


Fig. 2. — Comparaisons, en séries fermées, des étalons du groupe principal.

fait partie du groupe principal (fig. 3). A l'intérieur de chaque groupe les étalons ont été comparés dans toutes les combinaisons possibles. Les 44 séries « aller » ont été effectuées du 2 au 13 décembre 1963 à une température moyenne de 20,012 °C et les 44 séries « retour » du 10 au 20 mars 1964 à une température moyenne de 20,007 °C.

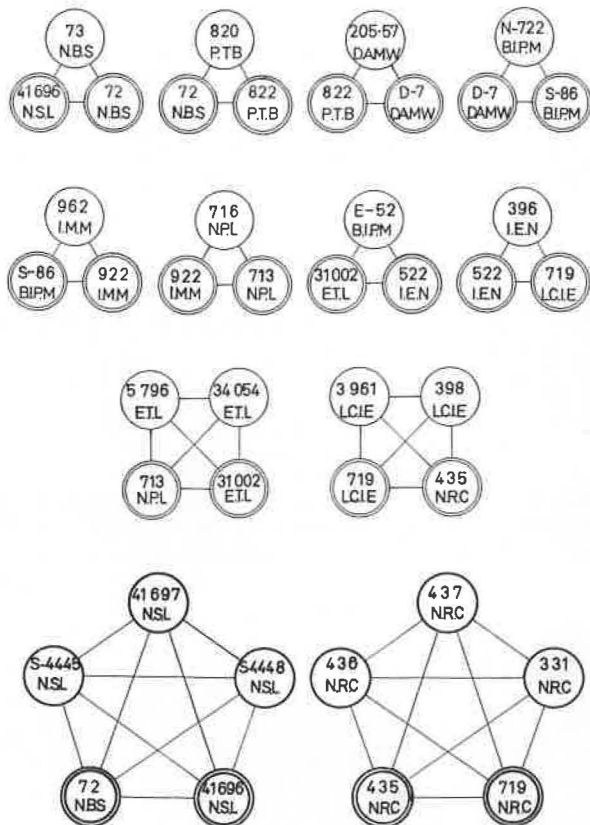


Fig. 3. — Comparaisons des étalons rattachés (groupes secondaires).

Le double cercle désigne les étalons ayant participé aux comparaisons du groupe principal.

RÉDUCTION DES OBSERVATIONS

Première méthode. Nous avons d'abord traité, par la méthode des moindres carrés, les 55 équations résultant de la comparaison des étalons du groupe principal (écart quadratique moyen : 0,08 $\mu\Omega$); nous en avons déduit la valeur de chaque étalon 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.

Nous avons ensuite traité individuellement, par la méthode des moindres carrés, les résultats fournis par chaque groupe secondaire et calculé les valeurs

des étalons rattachés à partir de celles des deux étalons du groupe principal figurant dans chaque groupe secondaire.

Deuxième méthode. Quelques semaines après l'achèvement des calculs précédents nous avons pu disposer d'une calculatrice électronique. Nous lui avons fait résoudre le système des 26 équations normales déduites des 99 équations de condition résultant de l'ensemble des observations.

TABLEAU II

Valeurs des étalons à 20 °C, en unité
du laboratoire d'origine, à la date du 26 janvier 1964

Les valeurs au 26 janvier 1964, date centrale de la comparaison, ont été calculées par interpolation linéaire à partir des résistances attribuées aux étalons par les laboratoires nationaux avant et après les mesures au Bureau International.

Étalons Nos	<u>D.A.M.W.</u>		Valeurs admises au 26 janvier 1964
	30 novembre 1963	16 décembre 1964	
205/57	1,000 081 1	1,000 080 6	1,000 081 03 Ω_{DAMW}
D-7	0,999 993 4	0,999 992 5	0,999 993 27 Ω_{DAMW}
	<u>1,000 037 25</u>	<u>1,000 036 55</u>	<u>1,000 037 15 Ω_{DAMW}</u>
	<u>P.T.B.</u>		
	octobre 1963	novembre 1964	
1106822	0,999 974 6	0,999 974 5	0,999 974 58 Ω_{PTB}
1106820	0,999 973 1	0,999 973 0	0,999 973 08 Ω_{PTB}
	<u>0,999 973 85</u>	<u>0,999 973 75</u>	<u>0,999 973 83 Ω_{PTB}</u>
	<u>N.B.S.</u>		
	4 septembre 1963	12 juin 1964	
72	1,000 010 1	1,000 009 9	1,000 010 00 Ω_{NBS}
73	1,000 012 7	1,000 012 6	1,000 012 65 Ω_{NBS}
	<u>1,000 011 40</u>	<u>1,000 011 25</u>	<u>1,000 011 32 Ω_{NBS}</u>
	Les valeurs à 20°C ont été calculées à partir des observations effectuées au N.B.S. à 25°C.		
	<u>N.S.L.</u>		
	20 août- 8 novembre 1963	17-25 juin 1964	
37951(S.4445)	1,000 040 9	1,000 042 1	1,000 041 44 Ω_{NSL}
37923(S.4448)	1,000 009 9	1,000 010 0	1,000 009 94
1217780(S.41696)	0,999 991 9	0,999 991 4	0,999 991 68
1217782(S.41697)	0,999 991 9	0,999 991 5	0,999 991 72
	<u>1,000 008 65</u>	<u>1,000 008 75</u>	<u>1,000 008 69 Ω_{NSL}</u>
	<u>N.R.C.</u>		
	22 octobre 1963	3 juillet 1964	
1029331	0,999 986 9	0,999 986 3	0,999 986 67 Ω_{NRC}
1336435	0,999 997 2	0,999 996 9	0,999 997 09
1336436	0,999 995 5	0,999 995 1	0,999 995 35
1336437	0,999 996 7	0,999 996 2	0,999 996 51
	<u>0,999 994 08</u>	<u>0,999 993 62</u>	<u>0,999 993 91 Ω_{NRC}</u>
	<u>L.C.I.E.</u>		
	20 novembre 1963	9 juin 1964	
638719	0,999 910 1	0,999 910 1	0,999 910 10 Ω_{LCIE}
3961	1,000 602 4	1,000 604 4	1,000 603 06
1541398	0,999 915 1	0,999 914 7	0,999 914 97
	<u>1,000 142 53</u>	<u>1,000 143 07</u>	<u>1,000 142 71 Ω_{LCIE}</u>

TABLEAU II (suite)

<u>I.E.N.</u>			
	15 octobre 1963	juin 1964	
755522	0,999 970 4	<u>0,999 970 5</u>	0,999 970 44 Ω_{IEN}
1527396	<u>0,999 966 1</u>	<u>0,999 969 5</u>	<u>0,999 967 38</u>
	0,999 968 25	<u>0,999 970 0</u>	0,999 968 91 Ω_{IEN}
<u>E.T.L.</u>			
	20 octobre 1963	26 mai 1964	
31002	1,000 439 0	1,000 438 5	1,000 438 78 Ω_{ETL}
34054	1,000 592 3	1,000 592 0	1,000 592 17
5796	<u>0,999 930 6</u>	<u>0,999 930 6</u>	0,999 930 60
	1,000 320 63	<u>1,000 320 37</u>	1,000 320 52 Ω_{ETL}
<u>N.P.L.</u>			
	septembre 1963	avril 1964	
L.713	1,000 050 4	1,000 050 6	1,000 050 52 Ω_{NPL}
L.716	<u>1,000 535 5</u>	<u>1,000 535 6</u>	1,000 535 56
	1,000 292 95	<u>1,000 293 10</u>	1,000 293 04 Ω_{NPL}
<u>I.M.M.</u>			
	juin 1963	juin 1964	
000922	1,000 014 7	1,000 014 5	1,000 014 58 Ω_{IMM}
000962	<u>1,000 029 4</u>	<u>1,000 028 6</u>	1,000 028 93
	1,000 022 05	<u>1,000 021 55</u>	1,000 021 76 Ω_{IMM}

TABLEAU III

Valeurs, à 20 °C, de tous les étalons voyageurs,
exprimées en fonction de l'unité de résistance
conservée par le Bureau International (Ω_{BIPM})

Étalons du groupe principal	Étalons des groupes secondaires
D-7 = 0,999 990 01	205/57 = 1,000 076 70
822 = 0,999 979 52	820 = 0,999 977 75
72 = 1,000 009 89	73 = 1,000 012 25
S.41696 = 0,999 988 16	S.41697 = 0,999 988 16
	S.4445 = 1,000 038 36
	S.4448 = 1,000 006 36
1336435 = 0,999 993 22	1029331 = 0,999 982 55
	1336436 = 0,999 991 51
	1336437 = 0,999 992 49
638719 = 0,999 900 86	3961 = 1,000 592 05
	1541398 = 0,999 895 73
755522 = 0,999 970 62	1527396 = 0,999 966 54
31002 = 1,000 438 38	34054 = 1,000 592 16
	5796 = 0,999 930 18
713 = 1,000 047 06	716 = 1,000 532 06
922 = 1,000 013 67	962 = 1,000 027 99

RÉSULTATS

Les valeurs des étalons, exprimées en Ω_{BIPM} (« unité » de résistance conservée par le B.I.P.M.), qui figurent dans le tableau II sont celles qui ont été obtenues par la calculatrice électronique; pour deux étalons

TABLEAU IV

Valeur de l' "unité" conservée par chaque laboratoire,
en fonction de Ω_{BIPM}

Les étalons qui ne figurent pas dans ce tableau ont été éliminés à la demande du laboratoire d'origine parce que leur valeur "retour" montrait qu'ils avaient subi des dommages au cours du transport.

D.A.M.W.

D-7 = 0,999 993 27	Ω _{DAMW} = 0,999 990 01	Ω _{BIPM} d' où Ω _{DAMW} = Ω _{BIPM} - 3,26 μΩ
205/57 = 1,000 081 03	Ω _{DAMW} = 1,000 076 70	Ω _{BIPM} d' où Ω _{DAMW} = Ω _{BIPM} - 4,33 μΩ
1,000 037 15	Ω _{DAMW} = 1,000 033 35	Ω _{BIPM} d' où Ω _{DAMW} = Ω _{BIPM} - 3,80 μΩ

P.T.B.

822 = 0,999 974 58	Ω _{PTB} = 0,999 979 52	Ω _{BIPM} d' où Ω _{PTB} = Ω _{BIPM} + 4,94 μΩ
820 = 0,999 973 08	Ω _{PTB} = 0,999 977 75	Ω _{BIPM} d' où Ω _{PTB} = Ω _{BIPM} + 4,67 μΩ
0,999 973 85	Ω _{PTB} = 0,999 978 64	Ω _{BIPM} d' où Ω _{PTB} = Ω _{BIPM} + 4,81 μΩ

N.B.S.

72 = 1,000 010 00	Ω _{NBS} = 1,000 009 89	Ω _{BIPM} d' où Ω _{NBS} = Ω _{BIPM} - 0,11 μΩ
73 = 1,000 012 65	Ω _{NBS} = 1,000 012 25	Ω _{BIPM} d' où Ω _{NBS} = Ω _{BIPM} - 0,40 μΩ
1,000 011 32	Ω _{NBS} = 1,000 011 07	Ω _{BIPM} d' où Ω _{NBS} = Ω _{BIPM} - 0,25 μΩ

N.S.L.

S(41696) = 0,999 991 68	Ω _{NSL} = 0,999 988 16	Ω _{BIPM} d' où Ω _{NSL} = Ω _{BIPM} - 3,52 μΩ
S(41697) = 0,999 991 72	Ω _{NSL} = 0,999 988 16	Ω _{BIPM} d' où Ω _{NSL} = Ω _{BIPM} - 3,56 μΩ
S(4448) = 1,000 009 94	Ω _{NSL} = 1,000 006 36	Ω _{BIPM} d' où Ω _{NSL} = Ω _{BIPM} - 3,58 μΩ
0,999 997 78	Ω _{NSL} = 0,999 994 23	Ω _{BIPM} d' où Ω _{NSL} = Ω _{BIPM} - 3,55 μΩ

N.R.C.

1336435 = 0,999 997 09	Ω _{NRC} = 0,999 993 22	Ω _{BIPM} d' où Ω _{NRC} = Ω _{BIPM} - 3,87 μΩ
1029331 = 0,999 986 67	Ω _{NRC} = 0,999 982 55	Ω _{BIPM} d' où Ω _{NRC} = Ω _{BIPM} - 4,12 μΩ
1336436 = 0,999 995 35	Ω _{NRC} = 0,999 991 51	Ω _{BIPM} d' où Ω _{NRC} = Ω _{BIPM} - 3,84 μΩ
1336437 = 0,999 996 51	Ω _{NRC} = 0,999 992 49	Ω _{BIPM} d' où Ω _{NRC} = Ω _{BIPM} - 4,02 μΩ
0,999 993 90	Ω _{NRC} = 0,999 989 94	Ω _{BIPM} d' où Ω _{NRC} = Ω _{BIPM} - 3,96 μΩ

L.C.I.E.

658719 = 0,999 910 10	Ω _{LCE} = 0,999 900 86	Ω _{BIPM} d' où Ω _{LCE} = Ω _{BIPM} - 9,24 μΩ
-----------------------	---------------------------------	--

I.E.N.

755522 = 0,999 970 44	Ω _{IEN} = 0,999 970 62	Ω _{BIPM} d' où Ω _{IEN} = Ω _{BIPM} + 0,18 μΩ
-----------------------	---------------------------------	--

E.T.L.

31002 = 1,000 438 78	Ω _{ETL} = 1,000 438 38	Ω _{BIPM} d' où Ω _{ETL} = Ω _{BIPM} - 0,40 μΩ
34054 = 1,000 592 17	Ω _{ETL} = 1,000 592 16	Ω _{BIPM} d' où Ω _{ETL} = Ω _{BIPM} - 0,01 μΩ
5796 = 0,999 930 60	Ω _{ETL} = 0,999 930 18	Ω _{BIPM} d' où Ω _{ETL} = Ω _{BIPM} - 0,42 μΩ
1,000 320 52	Ω _{ETL} = 1,000 320 24	Ω _{BIPM} d' où Ω _{ETL} = Ω _{BIPM} - 0,28 μΩ

N.P.L.

713 = 1,000 050 52	Ω _{NPL} = 1,000 047 06	Ω _{BIPM} d' où Ω _{NPL} = Ω _{BIPM} - 3,46 μΩ
716 = 1,000 535 56	Ω _{NPL} = 1,000 532 06	Ω _{BIPM} d' où Ω _{NPL} = Ω _{BIPM} - 3,50 μΩ
1,000 293 04	Ω _{NPL} = 1,000 289 56	Ω _{BIPM} d' où Ω _{NPL} = Ω _{BIPM} - 3,48 μΩ

I.M.M.

922 = 1,000 014 58	Ω _{IMM} = 1,000 013 67	Ω _{BIPM} d' où Ω _{IMM} = Ω _{BIPM} - 0,91 μΩ
962 = 1,000 028 93	Ω _{IMM} = 1,000 027 99	Ω _{BIPM} d' où Ω _{IMM} = Ω _{BIPM} - 0,94 μΩ
1,000 021 76	Ω _{IMM} = 1,000 020 83	Ω _{BIPM} d' où Ω _{IMM} = Ω _{BIPM} - 0,93 μΩ

seulement l'écart entre les résultats fournis par les deux méthodes a atteint $0,03 \mu\Omega$, quantité absolument négligeable.

Les calculs qui nous ont permis de comparer l'« unité » de résistance conservée par chacun des grands laboratoires nationaux à celle du Bureau International sont reproduits dans les tableaux II à IV.

TABLEAU V
Résultats de la 10^e comparaison
(au 26 janvier 1964)

Allemagne { [D.A.M.W.]	$\Omega_{DAMW} = \Omega_{BIPM} - 3,8 \mu\Omega$
{ [P.T.B.]	$\Omega_{PTB} = + 4,8$
Amérique (États-Unis d') [N.B.S.]	$\Omega_{NBS} = - 0,2_5$
Australie [N.S.L.]	$\Omega_{NSL} = - 3,5_5$
Canada [N.R.C.]	$\Omega_{NRC} = - 4,0$
France [L.C.I.E.]	$\Omega_{LCIE} = - 9,2$
Italie [I.E.N.]	$\Omega_{IEN} = + 0,2$
Japon [E.T.L.]	$\Omega_{ETL} = - 0,3$
Royaume-Uni [N.P.L.]	$\Omega_{NPL} = - 3,5$
U.R.S.S. [I.M.M.]	$\Omega_{IMM} = - 0,9$

TABLEAU VI
Valeurs des « unités » de résistance
conservées par les laboratoires nationaux
en fonction de l'« unité » conservée par le B.I.P.M.

$$\Omega_{\text{laboratoire}} = \Omega_{BIPM} + \Delta(\mu\Omega)$$

	février 1950 Δ	octobre 1953 Δ	juillet 1955 Δ	octobre 1957 Δ	janvier 1961 Δ	janvier 1964 Δ
D.A.M.W.	+ 17,9	+ 22	+ 20,9	+ 16,9	0	- 3,8
P.T.B.		+ 1,7	+ 2,0	+ 3,3	+ 3,7 ₅	+ 4,8
N.B.S.	- 0,4	- 0,2	0,0	- 1,0	- 0,4	- 0,2 ₅
N.S.L.					- 3,5	- 3,5 ₅
N.R.C.		- 4,3	- 5,2	- 4,8	- 4,1 ₅	- 4,0
L.C.I.E.	+ 1,0	- 5,0	- 6,2	- 7,4	- 8,5	- 9,2
I.E.N.					0	+ 0,2
E.T.L.	- 2,1	- 1,0	- 0,2	- 0,4	- 0,3	- 0,3
N.P.L.	- 2,6	- 4,1	- 3,4	- 3,4	- 3,4	- 3,5
I.M.M.	+ 1,0	+ 0,8	+ 2,0	+ 0,4	- 0,7	- 0,9

(¹) L'unité conservée par le D.A.M.W. a été comparée à l'unité conservée par le B.I.P.M. en septembre 1961.

CONCLUSION

Nous estimons que les résultats donnés dans le tableau V sont exacts à quelques $10^{-7} \Omega$. Ils confirment les résultats de la comparaison de 1961. Les valeurs relatives des « unités » de résistance conservées par les grands

laboratoires nationaux n'ont pratiquement pas varié; ces résultats permettent certainement d'assurer une coordination internationale à 10^{-6} près.

Mais avec quelle exactitude les « unités » nationales et Ω_{BIPM} correspondent-elles à leur définition et représentent-elles l'ohm absolu? Quelques physiciens ont posé la question qui devra retenir l'attention du Comité Consultatif d'Électricité.

(16 février 1965)

ANNEXE 2

Rapport sur la 10^e comparaison des étalons nationaux de force électromotrice

(janvier-février 1964)

Par G. LECLERC

Bureau International des Poids et Mesures

Pour participer à cette comparaison chacun des dix laboratoires nationaux désignés par le Comité International des Poids et Mesures a envoyé à Sèvres cinq ou six éléments Weston de premier ordre du type saturé. Ces piles sont parvenues au Bureau International de la même manière que les étalons de résistance ⁽¹⁾, sauf celles de l'Istituto Elettrotecnico Nazionale (Italie) qui ont été apportées et remportées à la main.

Nous avons eu ainsi à comparer entre eux, deux à deux, dans toutes les combinaisons possibles, les onze groupes d'éléments Weston suivants :

- Groupe D.A.M.W. : N^{os} 5420, 5421, 5422, 5423, 5424, 5425.
- P.T.B. : N^{os} 631, 632, 633, 634, 635.
 - N.B.S. : N^{os} 959, 960, 964, 965, 1173, 1174.
 - N.S.L. : N^{os} H. 4596, G. 9521, G. 9668, 10401, 10406, 11249.
 - N.R.C. : N^{os} 5914, 5916, 5917, 605144, 605174, 605177.
 - L.C.I.E. : N^{os} 7353, 7356, 7357, 7358, 7359.
 - I.E.N. : N^{os} 7351, 7352, 7362, 7363, 7366.
 - E.T.L. : N^{os} 456, 579, A. 71, A. 78, A. 82.
 - N.P.L. : N^{os} 5821, 5822, 5823, 5824, 5825, 5826.
 - I.M.M. : N^{os} 5641, 5648, 5649, 5651, 5661.
 - B.I.P.M. : N^{os} 719, 720, 730, 732, 820, 822, 823, 824, 826, 827.

(1) Annexe 1, Tableau I, p. E 20.

TABLEAU I

Valeurs des éléments Weston, exprimées en
"unité" du laboratoire d'origine, à la date du 26 janvier 1964

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

Nos des éléments	D.A.M.W.		Valeurs moyennes admises au 26 janvier 1964
	27 novembre 1963	5 janvier 1965	
5420	1,018 660 9	1,018 663 0	1,018 661 95 V _{DAMW}
5421	674 5	673 7	674 10
5422	657 6	657 5	657 55
5423	654 0	659 9	656 95
5424	645 4	640 4	647 40
5425	693 1	689 3	691 20
	<u>1,018 664 25</u>	<u>1,018 665 47</u>	<u>1,018 664 86</u> V _{DAMW}
	<u>P.T.B.</u>		
	octobre-novembre 63	octobre-novembre 64	
631	1,018 639 8	1,018 640 6	1,018 640 20 V _{PTB}
632	643 8	644 1	643 95
633	639 1	641 3	640 20
634	635 3	635 2	635 25
635	641 8	642 9	642 35
	<u>1,018 639 96</u>	<u>1,018 640 82</u>	<u>1,018 640 39</u> V _{PTB}
	<u>N.B.S.</u>		
	30 août 1963	13 juillet 1964	
959	1,018 626 3	1,018 625 6	1,018 625 95 V _{NBS}
960	631 8	631 8	631 80
964	627 1	627 7	627 40
965	620 6	619 4	620 00
1173	651 1	652 1	651 60
1174	646 7	647 8	647 25
	<u>1,018 633 93</u>	<u>1,018 634 07</u>	<u>1,018 634 00</u> V _{NBS}
	<u>N.S.L.</u>		
	18 octobre-8 novembre 63	19 juin-13 juillet 64	
H4596	1,018 558 5	1,018 556 6	1,018 557 55 V _{NSL}
09521	565 0	563 7	564 35
09668	565 0	563 9	564 45
10401	599 4	594 8	597 10
10406	602 7	602 2	602 45
11249	609 9	606 7	608 30
	<u>1,018 583 42</u>	<u>1,018 581 32</u>	<u>1,018 582 37</u> V _{NSL}
	<u>N.R.C.</u>		
	26 septembre-29 octobre 1963	19 juin-23 juillet 64	
5814	1,018 623 1	1,018 624 2	1,018 623 65 V _{NRC}
5916	623 1	623 9	623 50
5917	622 0	623 5	622 75
605144	601 1	604 0	602 55
605174	598 4	601 6	600 00
605177	604 6	591 6	598 10
	<u>1,018 612 05</u>	<u>1,018 611 47</u>	<u>1,018 611 76</u> V _{NRC}

TABLEAU I (suite)

		<u>L.C.I.E.</u>			
		18 novembre 1963	27 mai 1964		
7353		1,018 627 3	1,018 628 3	1,018 627 80	V _{LCIE}
7356		628 2	629 3	628 75	
7357		628 2	628 2	628 20	
7358		627 0	626 7	626 85	
7359		627 5	627 6	627 55	
		<u>1,018 627 64</u>	<u>1,018 628 02</u>	<u>1,018 627 85</u>	V _{LCIE}

		<u>I.E.N.</u>			
		sept.-oct. 63	juin 1964		
7351		1,018 623 0	1,018 623 3	1,018 623 15	V _{IEN}
7352		622 6	623 1	622 85	
7362		612 6	611 3	611 95	
7363		611 0	609 0	610 00	
7366		619 3	618 7	619 00	
		<u>1,018 617 7</u>	<u>1,018 617 08</u>	<u>1,018 617 39</u>	V _{IEN}

		<u>E.T.L.</u>			
		1 ^{er} novembre 63	30 mai 1964		
456		1,018 656 8	1,018 658 0	1,018 657 40	V _{ETL}
579		648 5	648 6	648 55	
A. 71		614 9	614 9	614 90	
A. 78		617 6	616 9	617 25	
A. 82		616 1	616 2	616 15	
		<u>1,018 630 78</u>	<u>1,018 630 92</u>	<u>1,018 630 85</u>	V _{ETL}

		<u>N.P.L.</u>			
		septembre 1963	avril-mai 1964		
5821		1,018 590 0	1,018 589 6	1,018 589 80	V _{NPL}
5822		589 5	589 4	589 45	
5823		589 8	589 8	589 80	
5824		610 6	610 7	610 65	
5825		608 7	609 0	608 85	
5826		613 8	614 0	613 90	
		<u>1,018 600 40</u>	<u>1,018 600 42</u>	<u>1,018 600 41</u>	V _{NPL}

		<u>I.M.M.</u>			
		avril 1963	juin 1964		
5641		1,018 619 3	1,018 619 8	1,018 619 55	V _{IMM}
5648		618 9	619 6	619 25	
5649		618 9	619 0	618 95	
5651		618 9	618 2	618 55	
5661		619 6	620 0	619 80	
		<u>1,018 619 12</u>	<u>1,018 619 32</u>	<u>1,018 619 22</u>	V _{IMM}

B.I.P.M.
(Moyenne de 10 éléments)

		octobre 1963	mai-juin 1964		
		1,018 622 95	1,018 622 14	1,018 622 55	V _{BIPM}

Dès leur arrivée au Bureau International, les piles ont été stabilisées en les conservant à l'abri de la lumière dans un bain d'huile de paraffine maintenu à $20 \pm 0,2$ °C. Les mesures ont commencé le 7 janvier 1964; les 55 séries « aller » ont été effectuées du 7 au 24 janvier à une température moyenne de 20,005 °C et les 55 séries « retour » du 28 janvier au 14 février à une température moyenne de 20,009 °C. Les mesures ont été effectuées en appliquant la méthode et en utilisant le dispositif potentiométrique décrits dans les *Travaux et Mémoires du B.I.P.M.*, **21**, 1952, pp. 43-65.

RÉDUCTION DES OBSERVATIONS

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

La valeur de chaque élément a été ensuite calculée en tenant compte de la différence qu'il présente par rapport à la valeur moyenne de son propre groupe.

Les calculs successivement effectués sont rassemblés dans les tableaux I à IV.

TABLEAU II

Valeurs des groupes, exprimées en fonction de
l'unité conservée par le Bureau International (V_{BIPM})

$$M = \frac{1}{11} (DAMW + PTB + NBS + NSL + NRC + LCIE + ETL + IEN + NFL + IMG + BIPM)$$

	D.A.M.W.	=	M	+ 38,32	μV
	P.T.B.	=	+ 15,78		
	N.B.S.	=	+ 8,55		
	N.S.L.	=	- 35,44		
	N.R.C.	=	- 11,21		
	L.C.I.E.	=	+ 1,50		
	I.E.N.	=	- 5,39		
	E.T.L.	=	+ 4,06		
	N.P.L.	=	- 19,57		
	I.M.M.	=	+ 4,03		
	B.I.P.M.	=	- 0,63		
Mais	B.I.P.M.	=	1,018 622 55	V_{BIPM}	
d'où	M	=	1,018 623 18	V_{BIPM}	
et	D.A.M.W.	=	1,018 661 50	V_{BIPM}	
	P.T.B.	=	638 96		
	N.B.S.	=	631 73		
	N.S.L.	=	587 74		
	N.R.C.	=	611 97		
	L.C.I.E.	=	624 68		
	I.E.N.	=	617 79		
	E.T.L.	=	627 24		
	N.P.L.	=	603 61		
	I.M.M.	=	627 21		

TABLEAU III

Valeurs des éléments de chaque groupe,
exprimées en fonction de V_{BIPM}

<u>D.A.M.W.</u>			<u>L.C.I.E.</u>		
N ^{os}		=			V _{BIPM}
5420	=	1,018 663 49	N ^{os}	7353 =	1,018 624 86
5421	=	669 05	7356 =	625 95	V _{BIPM}
5422	=	652 58	7357 =	625 10	
5423	=	653 09	7358 =	623 26	
5424	=	643 25	7359 =	624 21	
5425	=	687 54		1,018 624 68	V _{BIPM}
	=	1,018 661 50			
		V _{BIPM}			
<u>P.T.B.</u>			<u>I.E.N.</u>		
N ^{os}		=	N ^{os}		=
631	=	1,018 638 94	7351	=	1,018 623 78
632	=	642 63	7352	=	624 05
633	=	638 55	7362	=	613 01
634	=	633 89	7363	=	610 17
635	=	640 74	7366	=	617 94
	=	1,018 638 95		=	1,018 617 79
		V _{BIPM}			V _{BIPM}
<u>N.B.S.</u>			<u>E.T.L.</u>		
N ^{os}		=	N ^{os}		=
959	=	1,018 623 74	456	=	1,018 654 15
960	=	629 33	579	=	645 24
964	=	624 69	A.71	=	610 92
965	=	618 23	A.78	=	613 69
1173	=	649 18	A.82	=	612 20
1174	=	645 22		=	1,018 627 24
	=	1,018 631 73			V _{BIPM}
		V _{BIPM}			
<u>N.E.L.</u>			<u>N.P.L.</u>		
N ^{os}		=	N ^{os}		=
H4596	=	1,018 563 35	5821	=	1,018 593 23
G9521	=	569 69	5822	=	592 68
G9668	=	569 96	5823	=	592 75
10401	=	602 66	5824	=	613 81
10406	=	608 33	5825	=	612 05
11249	=	612 46	5826	=	617 13
	=	1,018 567 74		=	1,018 603 61
		V _{BIPM}			V _{BIPM}
<u>N.R.C.</u>			<u>I.M.M.</u>		
N ^{os}		=	N ^{os}		=
5914	=	1,018 622 03	5641	=	1,018 627 17
5916	=	621 58	5648	=	627 22
5917	=	621 03	5649	=	627 15
605144	=	602 80	5651	=	626 98
605174	=	601 29	5661	=	627 54
605177	=	603 10		=	1,018 627 21
	=	1,018 611 97			V _{BIPM}
		V _{BIPM}			

TABLEAU IV

Valeur de 1 "unité" conservée par chaque
laboratoire, en fonction de V_{BIPM}

Les étalons qui ne figurent pas dans ce tableau ont été éliminés après accord du laboratoire d'origine "retour" faitait apparaître une variation anormale, probablement due au transport.

D.A.M.W.

Nos	5421 =	1,018 674 10	V _{DMW} =	1,018 669 05	V _{BIPM} d'où	V _{DMW} = V _{BIPM} - 4,96	μV
	5422 =	657 55	"	652 58	"	" - 4,88	
	5423 =	656 95	"	653 09	"	" - 3,79	
	5424 =	647 40	"	643 25	"	" - 4,07	
	5425 =	691 20	"	687 54	"	" - 3,59	
		1,018 665 44	V _{DMW} =	1,018 661 10	V _{BIPM} d'où	V _{DMW} = V _{BIPM} - 4,26	μV

P.T.B.

Nos	631 =	1,018 640 20	V _{PTB} =	1,018 638 94	V _{BIPM} d'où	V _{PTB} = V _{BIPM} - 1,24	μV
	632 =	643 95	"	642 65	"	" - 1,30	
	633 =	640 20	"	638 55	"	" - 1,62	
	634 =	635 25	"	633 89	"	" - 1,34	
	635 =	642 35	"	640 74	"	" - 1,58	
		1,018 640 39	V _{PTB} =	1,018 638 95	V _{BIPM} d'où	V _{PTB} = V _{BIPM} - 1,42	μV

N.B.S.

Nos	959 =	1,018 625 95	V _{NBS} =	1,018 623 74	V _{BIPM} d'où	V _{NBS} = V _{BIPM} - 2,17	μV
	960 =	631 80	"	629 33	"	" - 2,42	
	964 =	627 40	"	624 69	"	" - 2,66	
	965 =	620 00	"	618 23	"	" - 1,74	
	1173 =	651 60	"	649 18	"	" - 2,38	
	1174 =	647 25	"	645 22	"	" - 1,99	
		1,018 634 00	V _{NBS} =	1,018 631 73	V _{BIPM} d'où	V _{NBS} = V _{BIPM} - 2,23	μV

N.S.L.

H4596	=	1,018 557 55	V _{NSL} =	1,018 563 35	V _{BIPM} d'où	V _{NSL} = V _{BIPM} + 5,69	μV
09521	=	564 35	"	569 69	"	" + 5,24	
09668	=	564 45	"	569 96	"	" + 5,41	
10401	=	597 10	"	602 66	"	" + 5,46	
10406	=	602 45	"	608 33	"	" + 5,77	
		1,018 577 18	V _{NSL} =	1,018 582 80	V _{BIPM} d'où	V _{NSL} = V _{BIPM} + 5,51	μV

N.R.C.

Nos	5914 =	1,018 623 65	V _{NRC} =	1,018 622 03	V _{BIPM} d'où	V _{NRC} = V _{BIPM} - 1,59	μV
	5916 =	623 50	"	621 58	"	" - 1,88	
	5917 =	622 75	"	621 03	"	" - 1,69	
		1,018 623 30	V _{NRC} =	1,018 621 55	V _{BIPM} d'où	V _{NRC} = V _{BIPM} - 1,72	μV

L.C.I.E.

Nos	7353 =	1,018 627 80	V _{LCIE} =	1,018 624 86	V _{BIPM} d'où	V _{LCIE} = V _{BIPM} - 2,89	μV
	7356 =	628 75	"	625 95	"	" - 2,75	
	7357 =	628 20	"	625 10	"	" - 3,04	
	7358 =	626 85	"	623 26	"	" - 3,52	
	7359 =	627 55	"	624 21	"	" - 3,28	
		1,018 627 83	V _{LCIE} =	1,018 624 68	V _{BIPM} d'où	V _{LCIE} = V _{BIPM} - 3,10	μV

I.E.N.

Nos	7351 =	1,018 623 15	V _{IEN} =	1,018 623 78	V _{BIPM} d'où	V _{IEN} = V _{BIPM} + 0,62	μV
	7352 =	622 85	"	624 05	"	" + 1,18	
	7362 =	611 95	"	613 01	"	" + 1,04	
	7363 =	610 00	"	610 17	"	" + 0,17	
		1,018 616 99	V _{IEN} =	1,018 617 75	V _{BIPM} d'où	V _{IEN} = V _{BIPM} + 0,75	μV

E.T.L.

Nos	456 =	1,018 657 40	V _{ETL} =	1,018 654 15	V _{BIPM} d'où	V _{ETL} = V _{BIPM} - 3,19	μV
	579 =	648 55	"	645 24	"	" - 3,25	
	A.71 =	614 90	"	610 92	"	" - 3,91	
	A.78 =	617 25	"	613 69	"	" - 3,49	
	A.82 =	616 15	"	612 20	"	" - 3,86	
		1,018 630 85	V _{ETL} =	1,018 627 24	V _{BIPM} d'où	V _{ETL} = V _{BIPM} - 3,54	μV

N.P.L.

Nos	5821 =	1,018 589 80	V _{NPL} =	1,018 593 23	V _{BIPM} d'où	V _{NPL} = V _{BIPM} + 3,37	μV
	5822 =	589 45	"	592 68	"	" + 3,17	
	5823 =	589 80	"	592 75	"	" + 2,90	
	5824 =	610 65	"	613 81	"	" + 3,10	
	5825 =	608 85	"	612 05	"	" + 3,14	
	5826 =	613 90	"	617 13	"	" + 3,17	
		1,018 600 41	V _{NPL} =	1,018 603 61	V _{BIPM} d'où	V _{NPL} = V _{BIPM} + 3,14	μV

I.M.M.

Nos	5641 =	1,018 619 55	V _{IMM} =	1,018 627 17	V _{BIPM} d'où	V _{IMM} = V _{BIPM} + 7,48	μV
	5648 =	619 25	"	627 22	"	" + 7,82	
	5649 =	618 95	"	627 15	"	" + 8,05	
	5651 =	618 55	"	626 98	"	" + 8,26	
	5661 =	619 80	"	627 54	"	" + 7,60	
		1,018 619 22	V _{IMM} =	1,018 627 21	V _{BIPM} d'où	V _{IMM} = V _{BIPM} + 7,48	μV

TABLEAU V

Résultats de la 10^e comparaison
(au 26 janvier 1964)

Allemagne { [D.A.M.W.]	$V_{DAMW} = V_{BIPM} - 4,3 \mu V$
{ [P.T.B.]	$V_{PTB} = - 1,4$
Amérique (États-Unis d') [N.B.S.]	$V_{NBS} = - 2,2$
Australie [N.S.L.]	$V_{NSL} = + 5,5$
Canada [N.R.C.]	$V_{NRG} = - 1,7$
France [L.C.I.E.]	$V_{LCIE} = - 3,1$
Italie [I.E.N.]	$V_{IEN} = + 0,8$
Japon [E.T.L.]	$V_{ETL} = - 3,5$
Royaume-Uni [N.P.L.]	$V_{NPL} = + 3,1$
U.R.S.S. [I.M.M.]	$V_{IMM} = + 7,8$

TABLEAU VI

Valeurs des « unités » de force électromotrice
conservées par les laboratoires nationaux,
en fonction de l'« unité » conservée par le B.I.P.M.

$$V_{\text{laboratoire}} = V_{BIPM} + \Delta(\mu V)$$

	février et avril 1950 Δ	juillet 1953 Δ	juillet 1955 Δ	octobre 1957 Δ	janvier 1961 Δ	janvier 1964 Δ
D.A.M.W.	- 10,2	- 2,8	+ 0,5	+ 1,1		- 4,3
P.T.B.		- 2,3	+ 0,6	+ 0,2	- 0,1	- 1,4
N.B.S.	+ 0,8	- 3,3	- 0,7	- 1,3	- 1,9	- 2,2
N.S.L.					+ 6,3	+ 5,5
N.R.C.		- 3,1	- 2,4	- 0,8	- 3,4	- 1,7
L.C.I.E.	- 0,1	- 1,8	- 1,8	- 2,1	- 3,2	- 3,1
I.E.N.					0	+ 0,8
E.T.L.	- 3,5	- 1,4	- 2,0	- 3,4	- 2,9	- 3,5
N.P.L.	+ 2,2	+ 3,2	+ 4,5	+ 5,2	+ 5,1	+ 3,1
I.M.M.	+ 23,0	+ 22,3	+ 9,3	+ 8,4	+ 6,8	+ 7,8

CONCLUSION

Si l'on admet que les éléments Weston, étalons délicats supportant mal les transports, ne permettent pas de comparer entre elles les « unités » nationales de force électromotrice avec une précision supérieure au micro-volt, cette 10^e comparaison ne fait apparaître aucune variation significative de ces « unités ».

Depuis 1955 l'écart maximal entre les « unités » conservées par les grands laboratoires nationaux reste de l'ordre de 10^{-5} V; pour les besoins actuels de la science cet écart est trop important et il serait souhaitable de le réduire par l'exécution de nouvelles déterminations absolues.

Après un examen approfondi de ces résultats, le Comité Consultatif d'Électricité devrait décider des valeurs à attribuer aux étalons de force électromotrice en dépôt à Sèvres pour que l'« unité » conservée par le Bureau International coïncide aussi bien que possible avec sa valeur théorique.

ANNEXE 3

Détermination absolue de Ω_{ETL}

Electrotechnical Laboratory (Japon)

La détermination absolue de l'ohm au moyen d'un étalon d'inductance propre, qui avait été commencée en 1952, a été achevée en 1964.

La méthode utilisée et les caractéristiques du dispositif de mesure ont déjà fait l'objet d'un rapport qui a été présenté au Comité Consultatif d'Électricité en 1961 [1]. Nous ne donnerons dans cette Note que le résultat auquel nous sommes parvenus.

TABLEAU I
*Valeur calculée et dimensions mesurées
de l'étalon d'inductance N° 15*

	1957	1964	
Diamètre moyen	29,933 724	29,933 995 cm	
Nombre total des spires	300	300	
Diamètre du fil d'enroulement	0,070 138	0,070 138 cm	
Pas moyen	0,100 002 026	0,100 003 043 cm	
Longueur totale	30,000 607 8	30,000 913 1 cm	
Valeur calculée de l'inductance	18,246 398	18,246 550 mH	
Erreur due à l'irrégularité du diamètre	- 0,000 011	- 0,000 008 mH	
Erreur due à l'irrégularité du pas	+ 0,000 088	+ 0,000 229 mH	
Correction due à la perméabilité de la bobine ($\mu = - 0,855 \times 10^{-6}$)	- 0,000 106	- 0,000 106 mH	
Valeur calculée L_e de l'inductance après corrections	18,246 369	18,246 665 mH	
Erreur {	due à la répartition du courant	$\pm 0,000 021$	$\pm 0,000 021$ mH
	sur la mesure des dimensions	$\pm 0,000 053$	$\pm 0,000 053$ mH
Erreur relative	± 3	$\pm 3 \times 10^{-6}$	
Écart entre deux mesures dû à la variation		du diamètre + 15×10^{-6}	
		du pas + 1×10^{-6}	

TABLEAU II

Estimation des erreurs

Mesures	Facteur	Erreur (en 10 ⁻⁶)	Erreur partielle (en 10 ⁻⁶)	Erreur totale (en 10 ⁻⁶)
Dimensionnelles	Diamètre de l'étalon d'inductance.....	± 2	± 3	± 10
	Diamètre du fil d'enroulement	± 1,8		
	Pas	± 1		
	Perméabilité	± 0,25		
	Répartition du courant	± 1		
Électriques	Pont de Maxwell-Wien	Différence entre les valeurs pour deux ou trois bornes du condensateur		
		Câble de liaison de l'inductance		
		Étalon de résistance en courant alternatif. Équilibrage du pont		
		Étalon de résistance.....		
	Pont à commutation de Maxwell	Équilibrage du pont.....		
Terme correctif				

Entre la valeur L_m de l'inductance déduite expérimentalement de la valeur de l'ohm conservé par l'E.T.L. et la valeur L_c de cette même inductance calculée à partir de ses dimensions, on a trouvé le rapport suivant

$$\frac{L_m}{L_c} = \frac{18,246\ 644\ \text{mH}}{18,246\ 665\ \text{mH}} = 0,999\ 999.$$

Nous estimons l'erreur totale égale à $\pm 10 \times 10^{-6}$ (voir tableau II), de sorte que

$$1\ \Omega_{\text{ETL}} = 1,000\ 001 (1 \pm 10 \times 10^{-6})\ \Omega_{\text{abs.}}$$

D'après le résultat de la comparaison internationale des étalons nationaux de résistance effectuée par le Bureau International en 1963-1964 :

$$\Omega_{\text{ETL}} - \Omega_{\text{BIPM}} = - 0,28 \times 10^{-6}\ \Omega,$$

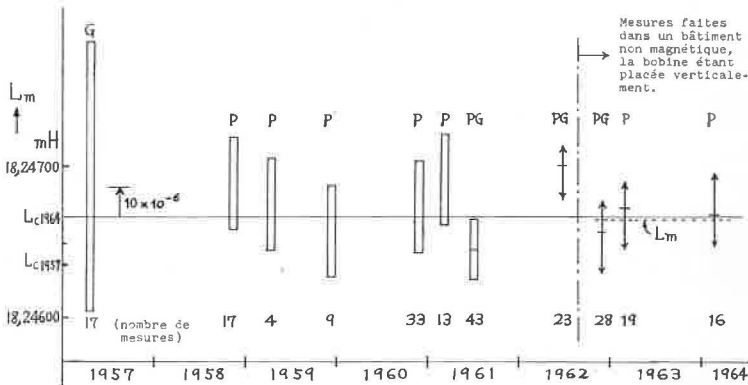


Fig. 1. — Résultats des mesures de l'étalon d'inductance N° 15 en fonction de Ω_{ETL} .

G : Étalon de résistance constitué d'un fil de manganine nu bobiné sur un cadre de verre ; P : Étalon de résistance constitué par un enroulement de manganine recouverte de polyéthylène sur une bobine en verre (pour le pont de Maxwell-Wien).

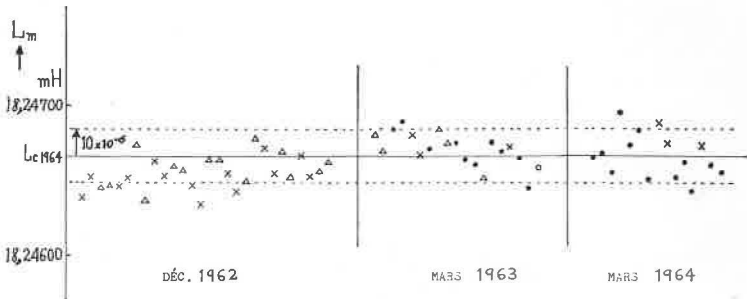


Fig. 2. — Résultats des trois dernières séries.

- × 400 Hz
 - Δ 180 Hz
 - 90 Hz
 - 18 Hz
- } pour le pont de Maxwell-Wien.

on en tire

$$\Omega_{\text{BIPM}} = 1,000\ 001\ 3\ \Omega_{\text{aba}}.$$

Les tableaux I et II et les figures 1 et 2 donnent des indications sur cette détermination.

(30 mars 1965)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *Comité Consultatif d'Électricité*, 9^e session, 1961, p. 36.
HARA (K.), *Researches of the E.T.L.*, N° 608, septembre 1961.
KANNO (M.), *Bull. E.T.L.*, 25, N° 7, 1961, p. 552.
HARA (K.), KOIZUMI (Y.) et IGARASHI (T.), *Bull. E.T.L.*, 27, N° 4, 1963, p. 261.
-

ANNEXE 4

Détermination absolue de l'ohm fondée sur un condensateur calculable

Par A. M. THOMPSON

National Standards Laboratory (Australie)

Abstract. — A brief description is given of the method used by N.S.L. to relate the value of the ohm to standards of length and time. The method is based on a type of capacitor for which changes in capacitance of the order of 0.25 pF may be calculated from a measured linear displacement. Measurements are consistent to the order of 1 in 10^7 and the main uncertainty in the final result is due to the uncertainty in the speed of light. As a preliminary result we have $\Omega_{\text{NSL}} = 1 \Omega - 3.6 \mu\Omega$.

Depuis un certain nombre d'années le N.S.L. travaille à la détermination absolue de l'ohm. Cette Note expose la méthode employée et donne le résultat provisoire obtenu.

L'étalon calculable de base est un « condensateur en croix » (*cross-capacitor*) cylindrique. Un rapport a déjà été présenté sur ce condensateur [1] et un compte rendu plus détaillé a été publié [2]. Ce condensateur permet d'effectuer des variations de capacité de l'ordre de 0,25 pF dont la valeur peut être calculée en unités électrostatiques avec une précision de 1×10^{-7} . La plus grande cause d'incertitude sur la valeur de la variation de la capacité exprimée en unités SI est l'incertitude sur la valeur de la vitesse de la lumière qui sert de facteur de conversion.

On utilise le procédé suivant pour déterminer la valeur des étalons de résistance de 1 ohm à partir de la variation de capacité calculée. De petits condensateurs de valeur fixe donnée sont comparés à l'étalon calculable par substitution. Ces petits condensateurs sont ensuite comparés à des condensateurs de plus grande valeur nominale par une série d'échelons multiplicateurs par 10, le rapport 10 étant obtenu à chaque échelon au moyen d'un transformateur étalonné avec précision. Quatre échelons sont nécessaires pour passer à des condensateurs de 5 000 pF. On compare, à la fréquence angulaire de 10^4 rad/s ($\approx 1\,592$ Hz), deux condensateurs

de 5 000 pF à deux résistances de 20 kΩ à l'aide d'un pont de fréquence. Les deux résistances montées en parallèle constituent une résistance de 10 kΩ dont on détermine la résistance en courant alternatif.

On passe de la valeur de la résistance de 10 kΩ déterminée en courant alternatif à la valeur correspondante en courant continu par une opération séparée, en utilisant comme référence des résistances dont les caractéristiques de transfert peuvent être calculées [3, 4].

La résistance de 10 kΩ est ensuite comparée en courant continu aux étalons de 1 Ω en effectuant successivement deux divisions par 100, les rapports 100/1 étant obtenus au moyen de deux bobines de passage spéciales [5].

Une mesure complète demande environ trois heures; en 1963, juste avant l'envoi des résistances au B.I.P.M. pour les comparaisons internationales de janvier 1964, on a entrepris l'exécution d'un programme comprenant environ trois mesures par semaine pendant plusieurs mois. Un programme identique commencé en novembre 1964 est actuellement en cours.

La précision de chaque étape de la mesure est de l'ordre de 1 à 2×10^{-8} et toutes les déterminations de l'ohm faites jusqu'à maintenant concordent à $\pm 1 \times 10^{-7}$ près. Jusqu'à présent, aucune dérive de la valeur de l'ohm australien supérieure à cette limite de $\pm 1 \times 10^{-7}$ n'a été constatée.

Si l'on prend pour la vitesse de la lumière la valeur

$$c = 2,997\,925 \times 10^8 \text{ m/s,}$$

on obtient pour la valeur de l'ohm conservé au N.S.L. :

$$\Omega_{\text{NSL}} = 1 \Omega - 3,6 \mu\Omega.$$

Les comparaisons internationales effectuées au B.I.P.M. en janvier 1964 donnent $\Omega_{\text{NSL}} = \Omega_{\text{BIPM}} - 3,55 \mu\Omega$. Nos mesures permettent ainsi de déduire :

$$\Omega_{\text{BIPM}} = 1 \Omega - 0,05 \mu\Omega.$$

Nous poursuivons les recherches pour améliorer les appareils employés et, dans le but d'effectuer une vérification complémentaire, nous avons l'intention de refaire les mesures en courant alternatif à une autre fréquence.

(Reçu le 4 mai 1965)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *Comité Consultatif d'Électricité*, 10^e Session, 1963, p. 58.
- [2] CLOTHIER (W. K.), A calculable standard of capacitance, *Metrologia*, **1**, N° 2, 1965, p. 36.
- [3] GIBBINGS (D.L.H.), A design for resistors of calculable a.c./d.c. ratio, *Proc. I.E.E.*, **110**, N° 2, February 1963.
- [4] GIBBINGS (D.L.H.), An alternating-current analogue of the Kelvin double bridge, *Proc. I.E.E.*, **109** C, 1962.
- [5] HAMON (B.V.), A 1-100 Ω build-up resistor for the calibration of standard resistors, *J. Sci. Instr.*, **31**, N° 12, 1954, p. 450.

ANNEXE 5

Détermination absolue de Ω_{NPL} par la méthode de Campbell

Par G. H. RAYNER

National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

Abstract. — An absolute determination of the NPL unit of resistance based on a new and more accurate Campbell type of calculable mutual inductor has been carried out on a modified and improved Campbell bridge. The value obtained was

$$1 \Omega_{\text{NPL}} = 1 - (4.4 \pm 3) \times 10^{-6} \Omega.$$

Le pont de Campbell est constitué par un circuit qui contient trois mailles. La maille primaire ou d'alimentation est couplée avec la maille secondaire au moyen d'une inductance mutuelle M_1 et avec la maille tertiaire ou détecteur au moyen d'une résistance r commune aux mailles primaire et tertiaire. La maille secondaire est une boucle fermée de résistance R , couplée avec les mailles primaire et tertiaire au moyen des inductances mutuelles M_1 et M_2 . L'équation fondamentale d'équilibre du pont est $\omega^2 M_1 M_2 = Rr$. Les deux inductances mutuelles ont une valeur nominale de 10 mH, égale à celle de l'étalon calculable, et leur valeur est déterminée par comparaison directe avec celui-ci. Les valeurs de R et r sont respectivement de 62 Ω et de 1 Ω environ et $\omega/2\pi = 125$ Hz. L'équation fondamentale théorique devient l'équation complète pratique lorsqu'on tient compte des effets d'un certain nombre de paramètres parasites.

Quatre séries de mesures ont été effectuées avec ce pont, deux en 1963 et deux en 1964; les résultats du tableau I donnent $\left(\frac{\Omega_{\text{NPL}}}{\Omega_{\text{std}}} - 1\right) \times 10^{-6}$.

Une des principales sources d'incertitude provient de la valeur de l'étalon primaire d'inductance mutuelle sur laquelle l'erreur probable est de $1,2 \times 10^{-6}$. Une autre cause possible d'erreur, d'importance comparable, provient de certains effets systématiques propres au pont. On avait observé des effets identiques dans le pont original, mais ces effets sont nettement

plus faibles dans le pont actuel. Il existe un certain nombre d'autres sources d'erreur connues qui introduisent des erreurs probables de quelques 10^{-7} .

TABLEAU I

22 novembre 1963	—	4,2
29 — —	—	3,9
3 novembre 1964	—	4,6
5 — —	—	4,7
Moyenne		4,4

L'erreur probable totale obtenue en additionnant les carrés de toutes les erreurs probables connues, est de $2,1 \times 10^{-6}$; comme il peut encore exister quelques petites sources d'erreur imprévisibles, on considère que l'erreur probable de la détermination est de 3×10^{-6} .

Comparaison avec d'autres déterminations. — Des déterminations fondées sur la méthode de Campbell ont déjà été effectuées au N.P.L. en 1936 et en 1951; les résultats de ces déterminations avaient donné

$$1 \Omega_{\text{NPL}} = 1 + 2 \times 10^{-6} \Omega.$$

L'étalon d'inductance original de Campbell, mesuré et recalculé à chaque fois, servait de base pour ces déterminations. Cet étalon n'a pas été mesuré depuis 1951 mais il a été comparé électriquement au nouvel étalon; sa nouvelle valeur a été trouvée inférieure de 7×10^{-6} à celle qui avait été calculée en 1951. Il convient de noter que cette différence correspond exactement, dans le calcul de la valeur du nouvel étalon, aux effets dus à la susceptibilité magnétique et à la répartition du courant dans les spires, effets dont il n'avait pas été tenu compte pour l'ancien étalon. Si l'ancien étalon n'a pas varié depuis 1951, les premiers résultats, exprimés en fonction de la valeur du nouvel étalon, seraient $1 - 5 \times 10^{-6} \Omega$.

La plus récente détermination de l'ohm est celle qui a été faite au N.B.S. en 1960 par Cutkosky. Effectuée à partir d'un condensateur calculable du type Thompson-Lampard elle a donné

$$1 \Omega_{\text{NBS}} = 1 + 2,3 \times 10^{-6} \Omega;$$

si l'on tient compte de la différence moyenne entre les unités du N.P.L. et du N.B.S., telle qu'elle résulte des comparaisons internationales de 1961 et de 1964, on obtient $1 \Omega_{\text{NPL}} = 1 - 0,8 \times 10^{-6} \Omega$.

Des déterminations antérieures ont été faites par Thomas *et al.*, au N.B.S. de 1938 à 1949 en utilisant la méthode de Wenner; ramené à l'unité actuelle, le résultat serait $1 \Omega_{\text{NBS}} = 1 - 3 \times 10^{-6} \Omega$, ce qui donnerait

$$1 \Omega_{\text{NPL}} = 1 - 6 \times 10^{-6} \Omega.$$

Romanowski et Olson ont utilisé en 1957 au N.R.C. une forme modifiée du circuit de Campbell; ils ont obtenu $1 \Omega_{\text{NRC}} = 1 - 8,2 \times 10^{-6} \Omega$. En tenant compte de la différence entre les unités N.P.L. et N.R.C. mesurées en 1957, on obtient $1 \Omega_{\text{NPL}} = 1 - 7 \times 10^{-6} \Omega$.

Le tableau II rassemble les résultats de ces diverses déterminations avec leurs erreurs probables.

TABLEAU II

Date	Auteur	Labo- ratoire	Ω_{NPL}	Erreur probable
1963-64	Cette Note	NPL	$1 - 4,4 \times 10^{-6}$	3×10^{-6}
1960	Cutkosky	NBS	$1 - 0,8 \times 10^{-6}$	$2,1 \times 10^{-6}$
1957	Romanowski et Olson	NRC	$1 - 7 \times 10^{-6}$	20×10^{-6}
1951	Rayner	NPL	$1 + 2 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6} (*)$
			$(1 - 5 \times 10^{-6}) (**)$	
1938-49	Thomas <i>et al.</i>	NBS	$1 - 6 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6} (*)$
1936	Hartshorn et Astbury	NPL	$1 + 2 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6} (*)$
			$(1 - 5 \times 10^{-6})(**)$	

(*) Erreur probable prise égale au 1/3 de l'erreur maximale.

(**) Compte tenu de la correction appliquée à la valeur de l'étalon primaire.

(Avril 1965)

Un électromètre absolu pour la détermination du volt

Par W. K. CLOTHIER

National Standards Laboratory (Australie)

Abstract. — An absolute electrometer using a conducting liquid as the moving electrode is being developed at N.S.L. with a view to its use in a determination of the volt. Under the action of an electric field between a fixed horizontal electrode and an underlying liquid surface, the liquid rises to form a plateau. The potential difference is determined from the height of the plateau and the vertical spacing between the liquid surface and the fixed electrode. These dimensions are measured interferometrically. Constants required in the determination are the density of the liquid, the permittivity of the dielectric and the acceleration due to gravity.

The effects of contact potential differences and surface imperfections are eliminated by a suitable measuring procedure.

Un nouveau type d'électromètre absolu est en cours d'étude au N.S.L. en vue de la détermination de l'unité électrostatique de différence de potentiel et par suite du volt. L'étude théorique de l'électromètre a été faite et les expériences préliminaires effectuées. Le principe de l'instrument est le suivant :

Sur la figure 1, *A* représente un plan optique en verre ou en silice fondue d'environ 25 cm de diamètre. La face inférieure du disque *A* est recouverte d'une couche conductrice *B* entourée d'un anneau de garde conducteur *C*. *B* et *C* sont dans le même plan horizontal, mais sont

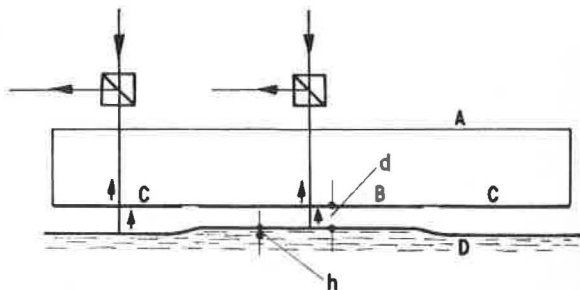


Fig. 1.

séparés l'un de l'autre par un intervalle isolant. D est un liquide conducteur placé à quelques millimètres au-dessous de la face inférieure du disque A .

Si l'on établit un champ électrique entre B et D , tandis qu'on maintient C et D au même potentiel, le liquide situé au-dessous de B s'élève et forme un plateau comme le montre la figure. Si le diamètre de B est suffisamment grand, la région centrale du plateau est sensiblement horizontale. Dans cette région la force électrostatique agissant sur chaque élément de surface du liquide est équilibrée par le poids du liquide contenu dans l'élément de volume prismatique ayant pour base l'élément de surface et pour hauteur la hauteur du plateau. Ces deux forces sont proportionnelles à l'aire et, en unités SI, l'équation d'équilibre se réduit à

$$V = d \sqrt{\frac{2\rho gh}{\epsilon_0 \epsilon_r}}$$

où

V , différence de potentiel existant entre les armatures en regard B et D ,

d , distance entre B et D ,

h , hauteur du plateau,

ρ , masse volumique du liquide,

g , accélération due à la pesanteur,

ϵ_0 , permittivité du vide,

ϵ_r , permittivité relative du diélectrique.

V est la somme de la différence de potentiel appliquée et de la différence de potentiel de contact entre les armatures. Les corrections dues au potentiel de contact peuvent être éliminées, en même temps que certaines erreurs sur d provenant d'effets de surface, en répétant l'expérience avec une distance entre les armatures et une différence de potentiel appliquée différentes, mais telles que la valeur de h soit la même.

Si d_1 et d_2 sont les distances entre les armatures et V_1 et V_2 les différences de potentiel appliquées on a

$$V_2 - V_1 = (d_2 - d_1) \sqrt{\frac{2\rho gh}{\epsilon_0 \epsilon_r}}$$

d'où

$$V_2 = \frac{d_2}{1 - \alpha} \sqrt{\frac{2\rho gh}{\epsilon_0 \epsilon_r}}$$

avec

$$\alpha = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{et} \quad d_1 = d_2 - d_1.$$

On montre que pour obtenir un équilibre stable, h ne doit pas dépasser $d/2$.

On se propose de mesurer les déplacements d_2 et h par une méthode interférentielle. ρ est déjà connue pour le mercure à 10^{-6} près, mais si l'on désire utiliser un autre liquide ρ devra être déterminée par une mesure indépendante.

Comme on le prévoyait, les expériences ont montré que l'obstacle principal à l'application de la méthode était l'existence de vibrations. Si cet obstacle peut être surmonté, il sera sans doute possible de déterminer le volt en valeur absolue à quelques millièmes près.

(Reçu le 26 mars 1965)

ANNEXE 7

Résultats de l'ensemble des mesures effectuées à l'I.M.M. sur les étalons de capacité voyageurs au mica de $0,1 \mu\text{F}$ ⁽¹⁾

Par I. KROTKOV et T. GOUTCHINA

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

Ce rapport complète les informations préliminaires communiquées au Comité Consultatif d'Électricité en 1963 [1]. Le procédé de comparaison des étalons de capacité voyageurs entre eux et aux étalons de référence de l'I.M.M. au moyen d'un pont de capacité, aux fréquences 50, 1 000 et 5 000 Hz a déjà été décrit [2].

Le fait nouveau dans les mesures effectuées en 1963, 1964 et 1965, est l'utilisation de deux méthodes pour déterminer la valeur absolue des condensateurs de base de l'I.M.M.

La première méthode, utilisée depuis 1949 et qui permet de rattacher l'unité de capacité aux unités d'inductance et de résistance, a déjà été exposée au Comité Consultatif en 1957 [3].

A cette époque nous pensions que cette méthode n'introduisait pas d'erreur systématique supérieure à 5×10^{-5} ni d'erreur accidentelle dépassant 3×10^{-5} . Mais des recherches ultérieures et les premiers résultats de la comparaison internationale circulaire des étalons de capacité semblent prouver l'existence d'une erreur systématique bien supérieure à celle que nous estimions, nous avons décidé de mettre en œuvre une seconde méthode.

Dans cette nouvelle méthode élaborée par I. Krotkov en 1962 [4], l'unité de capacité est déduite des unités de résistance et de temps. Nous pensons qu'elle conduit à des résultats connus à 2×10^{-5} près.

Par l'une ou l'autre méthode, on détermine la capacité de condensateurs de 4×10^5 pF auxquels on compare ensuite, après les avoir mis en parallèle, les quatre condensateurs de 1×10^5 pF qui constituent les

⁽¹⁾ Cette Note rassemble deux rapports communiqués en juillet 1964 et en mai 1965.

TABLEAU I

Résultats des mesures à l'I.M.M. des paramètres
des condensateurs participant à la comparaison circulaire internationale (1re méthode)

Condensateur N°	Capacités (pF)					Différence de capacité (pF)			Tangentes des angles de pertes ($\times 10^4$)					Différence des tangentes des angles de pertes ($\times 10^4$)			
	Fréquence (Hz)	1959	1963	1964 (janv.)	1964 (nov.)	1965 (fév.)	1965-59	1964-63	1965-64	1959	1963	1964 (janv.)	1964 (nov.)	1965 (fév.)	1963-59	1964-63	1965-64
14	50	100 008	100 009	100 011	100 011	100 010	+ 1	+ 2	- 1,0	5,2	5,0	5,1	4,5	4,4	- 0,2	+ 0,1	- 0,7
	1000	99 987	99 989	99 989,5	99 990	99 991	+ 2	+ 0,5	+ 1,5	1,0	1,0	1,0	0,9	1,1	0	0	+ 0,1
	5000	99 991	99 983	-	99 983	-	- 8	-	-	1,4	0,8	1,1	1,1	-	- 0,6	-	-
22	50	99 872	99 879	99 859	-	-	+ 7	- 3	-	5,5	5,4	1,1	-	-	+ 0,1	0	-
	1000	99 856	99 856	-	-	-	+ 12	0	-	0,9	1,1	1,1	-	-	+ 0,2	0	-
	5000	99 856	99 856	-	-	-	0	-	-	1,9	1,6	-	-	-	+ 0,3	-	-
580407	50	100 049	100 048	100 048	100 046	100 046	- 1	0	- 2	3,4	3,0	3,1	2,5	2,7	- 0,4	+ 0,1	- 0,4
	1000	100 025	100 023	100 022	100 022	100 022	- 2	- 1	0	1,3	1,5	1,4	1,2	1,4	+ 0,2	- 0,1	0
	5000	100 020	100 011	-	100 014+5	-	- 9	-	-	1,8	1,5	-	1,5	-	- 0,3	-	-
580409	50	100 050	100 049	100 049	100 047	100 047	- 1	0	- 2	3,3	3,0	3,1	2,5	2,7	- 0,3	+ 0,1	- 0,4
	1000	100 026	100 024	100 023	100 022	100 023	- 8	- 1	0	1,7	1,4	1,4	1,5	1,4	+ 0,3	0	0
	5000	100 021	100 013	-	100 013+5	-	- 8	-	-	1,7	1,4	-	1,5	-	+ 0,5	-	-
4886	50	99 982	100 003	100 007	-	100 008	+ 21	+ 4	+ 3	2,7	2,4	2,5	-	2,2	- 0,3	+ 0,1	- 0,3
	1000	99 970	99 989	99 994	-	99 997	+ 29	+ 5	+ 3	0,7	0,6	0,7	-	0,7	+ 0,2	+ 0,1	0
	5000	99 975	99 984	-	-	-	+ 9	-	-	1,3	0,8	-	-	-	- 0,5	-	-
4888	50	100 000	99 995	99 984	99 984	99 985	- 5	- 11	+ 1	2,8	2,5	2,6	2,1	2,3	- 0,3	+ 0,1	- 0,3
	1000	99 988	99 981	99 952	99 971	99 973	- 7	- 29	+ 21	0,6	0,7	0,7	0,5	0,7	+ 0,1	0	0
	5000	99 991	99 977	-	99 967	-	- 14	-	-	1,2	0,9	-	0,9	-	- 0,3	-	-
4482	50	100 066	100 072	100 073	100 073	100 076	+ 6	+ 1	+ 2	3,3	3,1	3,2	2,6	1,2	- 0,2	+ 0,1	0
	1000	100 046	100 052	100 054	100 054	100 056	+ 3	+ 2	-	0,9	1,1	1,2	1,0	1,2	+ 0,2	+ 0,1	0
	5000	100 047	100 042	-	100 048	-	- 5	-	-	1,6	1,2	1,2	1,5	-	- 0,4	-	-

étalons primaires de l'I.M.M. La valeur absolue de chacun des étalons primaires est déduite de celle de leur somme en comparant ces étalons l'un à l'autre et en utilisant la méthode des moindres carrés (Legendre-Gauss).

RÉSULTATS

Les caractéristiques diélectriques différentes des condensateurs étudiés influencent d'une manière différente les caractéristiques du circuit de mesure.

Pour les condensateurs fournis par l'Electrotechnical Laboratory du Japon (Nos 580407 et 580409) les phénomènes passagers qui suivent la mise en circuit s'atténuent beaucoup plus rapidement que pour les autres condensateurs.

Dans le tableau I nous avons rassemblé les valeurs des capacités et des tangentes des angles de pertes des sept condensateurs voyageurs; les capacités sont évaluées en fonction de l'unité de capacité obtenue par la première méthode, c'est-à-dire déduite des unités d'inductance et de résistance.

Dans le tableau II figurent les résultats des déterminations des condensateurs Nos 49 et 50 de 4×10^5 pF. Les valeurs obtenues par l'une et l'autre méthode diffèrent en moyenne de $13,4 \times 10^{-5}$, c'est-à-dire d'une quantité supérieure d'environ 7×10^{-5} à la limite d'incertitude admise jusqu'alors sur les résultats fournis par la première méthode [1].

TABLEAU II

*Résultats de la détermination en valeur absolue
des condensateurs de l'I.M.M. par deux méthodes*

Condensateur No	Date	1 ^{re} Méthode [C(L, R)] (pF)	2 ^e Méthode [C(ω , R)] (pF)	ΔC (pF)	$\frac{\Delta C}{C} \times 10^5$
50	mai-juin 1963	399 892,0	399 948,7	56,7	14,2
49	} octobre 1963	399 902,1	399 958,1	56,0	14,0
		février 1964	399 906,0	399 953,7	47,7
Moyenne					13,4

Les mesures ont été faites par T. Goutchina et V. Novikov.

Il semble que la seconde méthode permette de reproduire le farad avec une incertitude moins grande que la première et nous la considérons comme plus absolue.

Les écarts entre les résultats des mesures effectuées à l'I.M.M. en mai 1963 et les résultats des mesures faites dans les autres laboratoires nationaux sont calculés dans les tableaux III et IV; pour le tableau III l'unité de capacité de l'I.M.M. est l'unité déduite des unités d'inductance et de résistance (1^{re} méthode); pour le tableau IV l'unité de capacité de l'I.M.M. est l'unité déduite des unités de résistance et de temps (2^e méthode).

TABLEAU III

Comparaison des résultats obtenus par les laboratoires nationaux et l'I.M.M. (1^{re} méthode)

Condensateur N°	Fréquence (Hz)	Différence de capacité (pF)			Différence de tangente des angles de pertes ($\times 10^4$)				
		IMM-DANW	IMM-PTB	IMM-LCIE	IMM-NPL	IMM-DANW	IMM-PTB	IMM-LCIE	IMM-NPL
14	50	0	- 19	-	- 17	+ 0,2	0	-	+ 0,6
	1000	+ 3	- 15	- 8	- 12	+ 0,1	- 0,1	+ 0,1	+ 0,1
	5000	- 7	- 17	-	-	- 0,2	- 0,5	-	-
22	50	+ 7	- 12	- 4	- 10	+ 0,2	+ 0,2	-	+ 0,4
	1000	+ 7	- 12	- 9	- 9	+ 0,2	0	-	+ 0,1
	5000	- 5	- 14	-	-	- 0,1	- 0,3	-	-
580407	50	- 2	- 20	-	- 15	+ 0,2	0	-	0
	1000	+ 2	- 15	- 9	- 12	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1
	5000	- 11	- 18	-	-	- 0,1	0	-	-
580409	50	- 2	- 19	- 9	- 15	+ 0,3	0	-	0
	1000	+ 1	- 15	-	- 12	0	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1
	5000	- 11	- 18	-	-	- 0,1	0	-	-
4886	50	+ 11	- 8	-	- 14	0	0	-	- 0,1
	1000	+ 11	- 6	- 9	- 14	0	- 0,1	- 0,1	0
	5000	+ 1	- 7	-	-	+ 0,1	- 0,1	-	-
4888	50	- 1	- 19	- 10	- 16	0	0	-	- 0,1
	1000	- 1	- 16	- 10	- 14	+ 0,1	0	- 0,1	0
	5000	- 10	- 17	-	-	+ 0,2	0	-	-
4482	50	+ 6	- 12	- 8	- 14	+ 0,2	+ 0,1	+ 0,1	0
	1000	+ 6	- 11	-	- 12	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	0
	5000	- 5	- 11	-	-	- 0,2	0	-	-

TABLEAU IV

Comparaison des résultats obtenus par les laboratoires nationaux et l'I.I.M.M. (2e méthode)

Condensateur N°	Fréquence (Hz)	Différence de capacité (pF)					Différence de tangente des angles de pertes (x 10 ⁻⁴)				
		IMM-DAMW	IMM-PTB	IMM-LCIE	IMM-NPL		IMM-DAMW	IMM-PTB	IMM-LCIE	IMM-NPL	
14	50	+ 13	- 6	- 5	- 4		+ 0,2	0	-	+ 0,6	
	1000	+ 16	- 2	+ 5	+ 1		+ 0,1	- 0,1	+ 0,1	+ 0,1	
	5000	+ 6	- 4	-	-		- 0,2	- 0,5	-	-	
22	50	+ 20	+ 1	+ 9	+ 3		+ 0,2	+ 0,2	-	+ 0,4	
	1000	+ 20	+ 1	-	-		+ 0,2	0	+ 0,2	+ 0,1	
	5000	+ 8	- 1	-	-		- 0,1	- 0,3	-	-	
580407	50	+ 11	- 7	+ 4	- 2		+ 0,2	0	+ 0,1	0	
	1000	+ 15	- 2	-	+ 1		+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	
	5000	+ 2	- 5	-	-		- 0,1	0	-	-	
580409	50	+ 11	- 6	+ 4	- 2		+ 0,3	0	+ 0,1	0	
	1000	+ 14	- 2	-	+ 1		0	+ 0,0	+ 0,1	+ 0,1	
	5000	+ 2	- 5	-	-		- 0,1	-	-	-	
4886	50	+ 24	+ 5	- 4	- 1		0	0	-	- 0,1	
	1000	+ 24	+ 7	+ 4	- 1		0	- 0,1	0	0	
	5000	+ 14	+ 6	-	-		+ 0,1	- 0,1	-	-	
4888	50	+ 12	- 6	- 3	- 3		0	0	-	- 0,1	
	1000	+ 12	- 3	+ 3	- 1		+ 0,1	0	- 0,1	0	
	5000	+ 3	- 4	-	-		+ 0,2	0	-	-	
4482	50	+ 19	+ 1	- 5	- 1		+ 0,2	0	+ 0,1	0	
	1000	+ 19	+ 2	+ 5	+ 1		+ 0,1	+ 0,0	+ 0,1	0	
	5000	+ 8	+ 2	-	-		- 0,2	-	-	-	

On constate que les résultats obtenus à l'I.M.M. en prenant comme unité de capacité celle qui est déduite des unités de résistance et de temps sont beaucoup plus voisins de ceux obtenus par d'autres laboratoires que les résultats fournis par la première méthode. Cependant, avant d'adopter définitivement une méthode, nous attendrons les résultats des travaux en cours pour déterminer le farad en valeur absolue à partir d'un condensateur « en croix » calculable.

CONCLUSION

La comparaison circulaire des condensateurs de $0,1 \mu\text{F}$ présente un grand intérêt et, à notre avis, doit être poursuivie par l'exécution de mesures dans les laboratoires nationaux qui n'y ont pas encore participé.

Malheureusement, d'importants retards dans les mesures, dus aux délais d'acheminement des instruments qui ne peuvent être transportés qu'*accompagnés*, diminuent un peu l'intérêt de la comparaison. Pour cette raison, nous suggérons de ne faire circuler dorénavant que les condensateurs Nos 580407 et 580409, ce qui faciliterait les transports et réduirait aussi la durée des mesures.

(Mai 1965)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *Comité Consultatif d'Électricité*, 10^e session, 1963, p. 39.
 - [2] *Comité Consultatif d'Électricité*, 9^e session, 1961, p. 53.
 - [3] *Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 26 B, 1958, p. E 72.
 - [4] Ce volume, p. E 57.
-

ANNEXE 8

Résultats de la première partie de la comparaison circulaire des étalons de capacité voyageurs au mica de 0,1 μF

Par G. LECLERC

Bureau International des Poids et Mesures

Le projet initial de cette comparaison [1] prévoyait que les condensateurs voyageurs, partis d'U.R.S.S. après avoir été mesurés à l'Institut de Métrologie D.I. Mendéléev, n'y reviendraient qu'à la fin de la comparaison après avoir été étudiés par tous les laboratoires nationaux participant à cette comparaison circulaire. Mais les résultats des premières mesures ayant fait soupçonner des évolutions assez rapides dans le temps des condensateurs, et la comparaison progressant beaucoup plus lentement que prévu, le Comité Consultatif d'Électricité jugea utile, en 1961, d'en modifier le cours [2]. Il décida que les étalons de capacité seraient renvoyés à Leningrad pour être mesurés une seconde fois à l'Institut de Métrologie, dès qu'ils auraient fini de circuler entre les laboratoires européens; la comparaison ne serait poursuivie que si les résultats obtenus à Leningrad faisaient apparaître un comportement satisfaisant des condensateurs voyageurs.

Les résultats de cette première partie de la comparaison sont donnés dans cette Note. Au cours de cette première partie les condensateurs furent étudiés successivement : à l'Institut de Métrologie D.I. Mendéléev de mai à septembre 1959, au Deutsches Amt für Messwesen und Warenprüfung pendant l'été de 1960, à la Physikalisch-Technische Bundesanstalt de novembre 1960 à juin 1961, au Laboratoire Central des Industries Electriques en mars 1962, au National Physical Laboratory en juin et septembre 1962, enfin de nouveau à l'Institut de Métrologie en 1963, 1964 et 1965.

Les résultats obtenus par ces cinq laboratoires sont rassemblés dans le tableau I qui donne les valeurs des capacités, et dans le tableau II qui donne celles des angles de pertes.

TABLEAU I
Valeurs des capacités en picofarads

Condensateur N°	Fréquence (Hz)	I. M. M. (1) mai-sept. 1959	D. A. M. W. été 1960	P. T. B. nov. 1960 à juin 1961	L. C. I. E. mars 1962	N. P. L.		I. M. M. (1)			
						juin 1962	sept. 1962	mai 1963	février 1964	nov. 1964	février 1965
4482	50	100 066	100 066	100 084			100 086	100 073	100 073	100 073	
	500	100 049	100 049	100 068			100 064	100 054	100 054	100 054	100 056
	5 000	100 047	100 047	100 063	100 060	100 063	100 064	100 042	100 048	100 048	
4886	50	99 982	99 992	100 011			100 017	100 007			100 008
	500	99 970	99 979	99 998	99 998	100 003	100 003	99 989			99 997
	5 000	99 975	99 983	99 991	99 991	99 998	99 994	99 984			
4888	50	100 000	99 996	100 014			100 011	99 995	99 984	99 984	99 985
	500	99 988	99 983	100 000			99 991	99 995	99 981	99 971	99 973
	5 000	99 991	99 987	99 997	99 991	99 991	99 991	99 977	99 977	99 967	
560407	50	100 049	100 050	100 068			100 063	100 048	100 048	100 046	100 046
	500	100 025	100 021	100 044			100 034	100 022	100 022	100 022	100 022
	5 000	100 020	100 022	100 038	100 032	100 034	100 035	100 011	100 011	100 014,5	
560409	50	100 050	100 051	100 068			100 064	100 049	100 049	100 047	100 047
	500	100 026	100 023	100 045			100 035	100 024	100 024	100 022	100 023
	5 000	100 021	100 024	100 031	100 033	100 035	100 036	100 013	100 013	100 015,5	
14	50	100 008	100 009	100 028			100 026	100 009	100 009	100 011	100 010
	500	99 987	99 986	100 008	99 997	100 001	100 001	99 989	99 989,5	99 990	99 991
	5 000	99 991	99 990	100 000	99 997	99 997	99 997	99 983	99 983	99 983	
22	50	99 872	99 872	99 891			99 889	99 879	99 879		
	500	99 850	99 857	99 877	99 866	99 869	99 871	99 862	99 859		
	5 000	99 856	99 861	99 870	99 866	99 869	99 871	99 856	99 856		

(1) Les résultats de l'I. M. M. figurant dans ce tableau sont exprimés en fonction de "l'unité" de capacité déduite des unités de résistance et d'inductance (première méthode).

TABLEAU II

Valeurs des tangentes des angles de pertes ($\times 10^4$)

Condensateur N°	Fréquence (Hz)	I. M. M. mai-sept. 1959	D. A. M. W. été 1960	P. T. B. nov. 1960 à juin 1961	L. C. I. E. B. mars 1962	N. P. L.		I. M. M.			
						juin 1962	sept. 1962	mai 1963	février 1964	nov. 1964	février 1965
4482	50	3,3	2,9	3,0		3,1		3,1		2,6	
	500	0,9	1,0	1,2		1,1		1,1		1,0	
	5 000	1,6	1,4	1,2	1,0			1,2		1,5	1,2
4886	50	2,7	2,4	2,4		2,5		2,4		2,5	
	500	0,7	0,7	0,8		0,6		0,6		0,7	
	5 000	1,3	0,7	0,9	0,7			0,8			0,7
4888	50	2,8	2,5	2,5		2,6		2,5		2,6	
	500	0,6	0,6	0,8		0,7		0,7		0,7	
	5 000	1,2	0,7	0,9	0,6			0,9		0,5	0,7
580407	50	3,4	2,8	3,0		3,0		3,0		3,1	
	500	1,3	1,4	1,5		1,4		1,5		1,4	
	5 000	1,8	1,6	1,5	1,4			1,5		1,5	1,4
580409	50	3,3	2,7	3,0		3,0		3,0		3,1	
	500	1,2	1,4	1,4		1,3		1,4		1,4	
	5 000	1,7	1,5	1,4	1,3			1,4		1,2	1,4
14	50	5,2	4,8	5,0		4,4		5,0		4,5	
	500	1,0	0,9	1,3		0,9		1,0		1,0	
	5 000	1,4	1,0	1,3	0,9			0,8		0,9	1,1
22	50	5,5	5,2	5,2		5,0		5,4			
	500	0,9	0,9	1,2		1,0		1,1			
	5 000	1,9	1,7	1,9	0,9			1,6		1,1	

On constate que les résultats des mesures effectuées à l'Institut de Métrologie en 1963-1965 sont différents de ceux obtenus en 1959.

Nous avons supposé que ces différences étaient dues uniquement à une évolution régulière des condensateurs dans le temps et, dans le tableau III, nous avons calculé la variation annuelle moyenne de chacun d'eux. Tenant compte de ces variations, nous avons alors corrigé les résultats des mesures faites par les divers laboratoires à des dates différentes; de façon à rendre les résultats comparables nous les avons recalculés pour une même époque: l'année 1964.

TABLEAU III

Évolution des condensateurs dans le temps (unité : pF)

Condensateur N°	Déterminations de l'I.M.M. à 1000 Hz		Variation en 5 ans	Variation annuelle
	Mai à septembre 1959	1964 (Moyenne des résultats 1963/64/65)		
4 482	100 049	100 054	+ 5	+ 1,0
4 886	99 970	99 993	+ 23	+ 4,6
4 888	99 988	99 969	- 19	- 3,8
580 407	100 025	100 022	- 3	- 0,6
580 409	100 026	100 023	- 3	- 0,6
14	99 987	99 990	+ 3	+ 0,6
22	99 850	99 860	+ 10	+ 2,0

Dans le tableau IV nous reproduisons les valeurs des capacités à la fréquence de 1 000 Hz, ainsi corrigées, des quatre condensateurs considérés comme les plus stables. Nous en avons déduit les positions relatives des « unités » de capacité employées par les divers laboratoires nationaux (tableau V).

TABLEAU IV

Capacités, à 1000 Hz, des quatre condensateurs les plus stables,
recalculées pour l'année 1965 en tenant compte de la dérive
des instruments dans le temps (unité : pF)

Condensateur N°	D.A.M.W.	P.T.B.	L.C.I.E.	N.P.L.	I.M.M.	Moyenne
4 482	100 050	100 066	100 062	100 065,5	100 055	100 059,7
580 407	100 018,6	100 036,2	100 030,8	100 033,3	100 021,6	100 028,1
580 409	100 020,6	100 037,2	100 031,8	100 034,3	100 022,4	100 029,3
14	99 988,4	100 005,8	99 998,2	100 002,2	99 990,5	99 997,0
	100 019,4	100 036,3	100 030,7	100 033,8	100 022,4	100 028,5

Dans le tableau V figurent les deux « unités » de capacité utilisées tour à tour par l'I.M.M. [3], la première déduite des unités d'inductance et de résistance, la seconde déduite des unités de résistance et de fréquence.

TABLEAU V

Résultat de la 1^{re} partie de la comparaison circulaire
des condensateurs de 0,1 μ F

$$\left(m = \frac{1}{5} [F_{\text{DAMW}} + F_{\text{PTB}} + F_{\text{LCIE}} + F_{\text{NPL}} + F_{\text{IMM(1)}}] \right)$$

$$\begin{aligned} F_{\text{DAMW}} &= m + 9 \times 10^{-5} \\ F_{\text{PTB}} &= - 8 \\ F_{\text{LCIE}} &= - 2 \\ F_{\text{NPL}} &= - 5 \\ F_{\text{IMM(1)}} &= + 6 \\ F_{\text{IMM(2)}} &= - 7 \end{aligned}$$

$F_{\text{IMM(1)}}$ représente l'« unité » de capacité que l'I.M.M. a déduite de ses « unités » d'inductance et de résistance (1^{re} méthode);

$F_{\text{IMM(2)}}$ représente l'« unité » de capacité que l'I.M.M. a déduite de ses « unités » de résistance et de fréquence (2^e méthode).

Conclusion. — Les mesures effectuées de 1959 à 1965 ont d'abord permis d'apprécier la stabilité de condensateurs considérés comme les meilleurs du genre; dans le cas le plus favorable cette stabilité ne dépasse pas 5×10^{-6} par an.

La comparaison a ensuite mis en évidence les désaccords existant entre les « unités » de capacité utilisées jusqu'alors par les divers laboratoires, désaccords qui peuvent dépasser le dix-millième, donc très importants. Elle a enfin confirmé le danger des erreurs systématiques, puisqu'on a pu constater dans un même laboratoire une différence supérieure à un dix-millième entre les résultats de déterminations du farad par deux méthodes.

Ainsi, malgré sa lenteur, la comparaison a été utile. Le Comité Consultatif d'Électricité [4] a donc décidé de poursuivre l'expérience, mais en ne faisant circuler désormais que les quatre condensateurs considérés comme les plus stables.

Au cours de la deuxième partie de la comparaison, les condensateurs N^{os} 4482, 580407, 580409 et 14 seront successivement étudiés au N.R.C., au N.B.S., au N.S.L., à l'E.T.L., à l'I.E.N. et une dernière fois à l'I.M.M.

(Juin 1965)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 28, 1960, p. 42.
- [2] *Comité Consultatif d'Électricité*, 9^e session, 1961, p. 14.
- [3] Ce volume, p. E 46.
- [4] Ce volume, p. E 13.

ANNEXE 9

Méthode précise pour déterminer une capacité à partir des unités de résistance et de fréquence

Par I. KROTKOV

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

Nous décrivons une méthode assez simple pour déterminer une capacité à partir des unités de résistance et de fréquence avec une erreur de l'ordre de 10^{-5} . Le procédé de mesure proposé pourrait être nommé « méthode des deux équilibrages » ; il utilise le fonctionnement à vide et en court-circuit ou bien la modification artificielle de la charge des bras du pont.

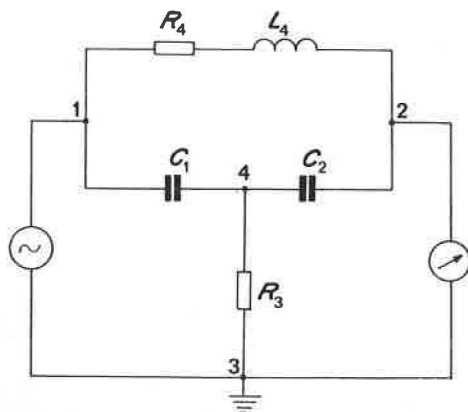


Fig. 1.

On équilibre d'abord le pont à quatre bras représenté sur la figure 1 ; ce pont comprend une bobine d'inductance L_4 , deux condensateurs C_1 , C_2 et deux résistances R_3 , R_4 . Un tel schéma fut proposé pour la première

fois par Tuttle pour mesurer avec une précision limitée les paramètres de bobines et de condensateurs aux fréquences élevées. Compte tenu du type de quadripôle que représente ce schéma nous le désignerons par la suite « pont à inductance-capacité en T ».

La condition d'équilibre d'un tel pont s'écrit [1]

$$(1) \quad \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_4 + \frac{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2}{\bar{Z}_3} = 0.$$

En résolvant cette équation dans le plan complexe on en déduit

$$(2) \quad R_3 R_{s(1)} = R_3 R_4 - \frac{1}{\omega^2 C_1 C_2} = 0$$

$$(3) \quad I_{m(1)} = \omega L_4 - \frac{1}{\omega} \frac{(C_1 + C_2)}{C_1 C_2} = 0.$$

Supposons que l'on puisse comparer les capacités des condensateurs C_1 et C_2 à l'aide d'un pont à capacité classique (pont de Schering par exemple), on connaîtra

$$(4) \quad C_1 - C_2 = \Delta C_{12}$$

ΔC_{12} étant la différence des lectures du condensateur réglable du pont.

On tire alors des équations (2) et (4)

$$R_3 R_4 = \frac{1}{\omega^2 C_1^2 \left(1 - \frac{\Delta C_{12}}{C_1}\right)}$$

d'où

$$(5) \quad C_1 = \frac{1}{\omega} \frac{1}{\sqrt{R_3 R_4}} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\Delta C_{12}}{C_1}}}.$$

En pratique, on choisit d'avance deux condensateurs C_1 et C_2 de capacité à peu près égale, soit $\Delta C_{12} \approx 0$, et

$$(5a) \quad C_1 \approx \frac{1}{\omega} \frac{1}{\sqrt{R_3 R_4}}.$$

Nous avons ainsi obtenu la relation idéale recherchée entre les grandeurs capacité, fréquence et résistance. Elle nous sert de base pour la détermination de capacités d'environ 10^7 ou 10^6 pF, aux basses fréquences, avec une précision de l'ordre de 10^{-5} .

Cependant, l'application de la méthode se complique du fait des imperfections des différents éléments du pont; ces imperfections conduisent à remplacer le schéma théorique de la figure 1 par le schéma réel de la figure 2 sur laquelle on a représenté les « paramètres résiduels ».

Lors de la comparaison de condensateurs (équation 4), on parvient aisément à éliminer l'influence des paramètres résiduels du pont en procédant par substitution; malheureusement la méthode du pont en T (équation 2) exige la présence simultanée des deux condensateurs; elle est donc nécessairement entachée d'une erreur. Désignons par $\Delta R_{(1)}$ cette erreur; l'équation (2) devient

$$(2a) \quad R_3 R_4 - \frac{1}{\omega^2 C_1 C_2} = \Delta R_{(1)}.$$

Les calculs conduisent [2] alors pour le terme correctif à l'expression suivante

$$\Delta R_{(1)} = 2 R_3 R_4 \frac{C_{35}}{C_1} - (r_1 + r_2 + r_4) R_3 - r_1 r_2 - \frac{R_4}{R_3} (\omega l_3)^2.$$

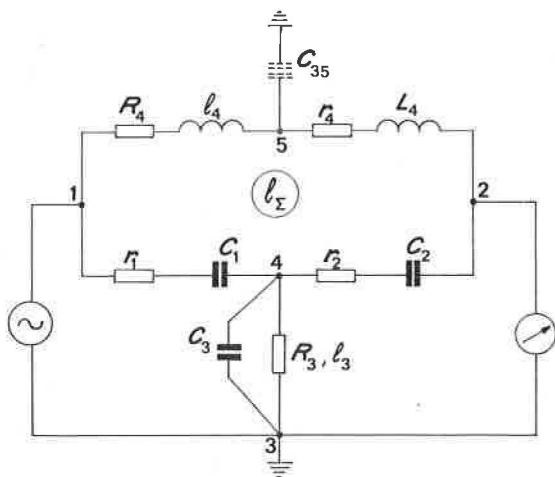


Fig. 2.

En résolvant le système formé par les équations (2a) et (4) on obtient

$$C_1 = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_3 R_4}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\Delta C_{12}}{C_1}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\Delta R_{(1)}}{R_3 R_4}}}$$

soit, en négligeant devant l'unité les termes inférieurs ou égaux à 10^{-5}

$$C_1 \approx \frac{1}{\omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_3 R_4}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\Delta C_{12}}{C_1}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - 2 \frac{C_{35}}{C_1} + 2\tau}}$$

ou

$$(5b) \quad C_1 = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_3 R_4}} \left[1 + \frac{C_{35}}{C_1} - \tau \right],$$

avec

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{1}{2} \left[\frac{r_4}{R_4} + \sqrt{\frac{R_3}{R_4}} \left(\operatorname{tg} \delta_1 + \frac{C_1}{C_2} \operatorname{tg} \delta_2 \right) + \left(\frac{\omega l_3}{R_3} \right)^2 \right] \\ &\approx \frac{1}{2} \left[\frac{r_4}{R_4} + \sqrt{\frac{R_3}{R_4}} \left(\operatorname{tg} \delta_1 + \operatorname{tg} \delta_2 \right) \right]. \end{aligned}$$

Aux basses fréquences on a généralement $10^{-3} < \tau < 10^{-1}$; τ dépend de la résistance de la bobine d'inductance (difficile à évaluer) et des angles de pertes des condensateurs. Cela rend impossible l'utilisation de ce procédé de mesure et conduit à employer une méthode détournée pour éliminer τ . Deux solutions sont possibles.

1° Procédé du « court-circuit » et du « fonctionnement à vide ».

On réalise deux équilibrages successifs du pont à inductance-capacité (fig. 3) comme suit :

1^{er} équilibrage : la résistance R_4 est mise en court-circuit et la résistance en parallèle R_3 est débranchée; il subsiste entre les points 3 et 4 du circuit une résistance R_3^0 telle que $R_3^0 > R_3$.

2^e équilibrage : les résistances R_4 et R_3 sont remises en circuit; mais on fait en sorte que l'inductance totale l_Σ le long du contour 1-5-2-4 reste pratiquement la même que dans le premier équilibrage.

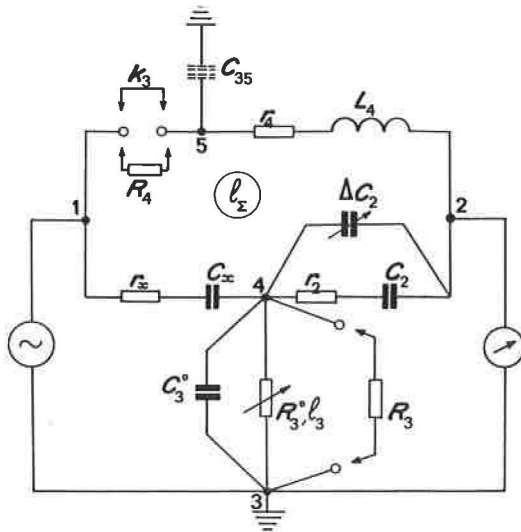


Fig. 3.

En soustrayant membre à membre les expressions des termes réels $R_{(1)}$ et $R_{(2)}$ relatifs à ces deux équilibrages, on obtient

$$(2b) \quad R_3[R_{(2)} - R_{(1)}] = R_3R_4 \left(1 - 2 \frac{C_{35}}{C_2}\right) - \frac{1}{\omega^2 C_x C_2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{R_3}{R_3^0}\right)}{\left(1 + \frac{\Delta C_2}{C_2}\right)} = 0$$

ou

$$C_x C_2 = \frac{1}{\omega^2 R_3 R_4} \cdot \frac{\left(1 - \frac{R_3}{R_3^0}\right)}{\left(1 + \frac{\Delta C_2}{C_2}\right)} \cdot \frac{1}{\left(1 - 2 \frac{C_{35}}{C_2}\right)}$$

En tenant compte de l'équation (4)

$$C_2 = C_1 - \Delta C_{12} = C_1 \left(1 - \frac{\Delta C_{12}}{C_1}\right)$$

on trouve

$$C_x = C_1 = \frac{1}{\omega \sqrt{R_3 R_4}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{\Delta C_2}{C_2}\right) \left(1 - \frac{\Delta C_{12}}{C_1}\right)}} \cdot \frac{\sqrt{\left(1 - \frac{R_3}{R_3^0}\right)}}{\left(1 - \frac{C_{35}}{C_2}\right)}$$

Il est facile de réaliser par avance un montage tel que $\Delta C_2 \approx 0$ et $\Delta C_{12} \approx 0$, de construire des résistances R_3 et R_4 ayant de faibles constantes de temps et d'obtenir un pont dans lequel $\frac{C_{35}}{C_2} \ll 1$. On peut donc écrire finalement

$$(6) \quad C_x = C_1 = \frac{1}{\omega \sqrt{R_3 R_4}} \left(1 + \frac{C_{35}}{C_2} - \frac{1}{2} \frac{R_3}{R_3^0}\right)$$

Il n'est plus nécessaire de déterminer le terme τ (de l'équation 5b) mais simplement la résistance R_3^0 , ce qui s'effectue sans difficulté.

2° Procédé du « changement de la charge » des bras du pont.

On effectue ici aussi deux équilibrages du pont à inductance-capacité (fig. 4), les impédances successives des bras R_3 et R_4 étant telles que

$$(R_4^{(1)} + r_4)R_3^{(1)} = (R_4^{(2)} + r_4)R_3^{(2)} = \text{constante.}$$

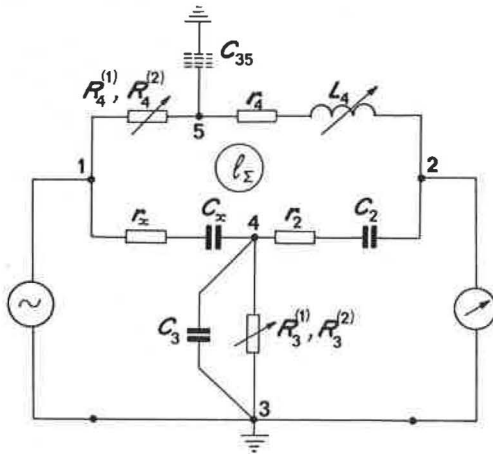


Fig. 4.

En effectuant les mêmes calculs que pour le premier procédé et en négligeant les termes de faible valeur, on obtient

$$(2c) \quad R_{(2)} - R_{(1)} = (R_4^{(2)} - R_4^{(1)}) \left(1 - 2 \frac{C_{35}}{C_2}\right) - \frac{1}{\omega^2 C_1 C_2} \left[\frac{G_3^{(2)}}{\left(1 + \frac{\Delta C_2}{C_2}\right)} - G_3^{(1)} \right] = 0,$$

$G_3^{(1)}$ et $G_3^{(2)}$ représentant les conductances successives du bras du pont.

Posons : $R_4^{(2)} - R_4^{(1)} = \Delta R_4$; alors

$$C_1 C_2 = \frac{1}{\omega^2} \frac{1}{\Delta R_4} \cdot \frac{1}{\left(1 - 2 \frac{C_{35}}{C_2}\right)} \left[\frac{G_3^{(2)}}{\left(1 + \frac{\Delta C_2}{C_2}\right)} - G_3^{(1)} \right];$$

comme d'après (4)

$$C_2 = C_1 - \Delta C_{12} = C_1 \left(1 - \frac{\Delta C_{12}}{C_1}\right),$$

on trouve

$$C_1 = C_x = \frac{1}{\omega} \frac{1}{\sqrt{\Delta R_4}} \sqrt{\frac{G_3^{(2)}}{\left(1 + \frac{\Delta C_2}{C_2}\right)} - G_3^{(1)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\Delta C_{12}}{C_2}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - 2 \frac{C_{35}}{C_2}}}.$$

En supposant comme précédemment que ΔC_2 et ΔC_{12} sont négligeables, on obtient finalement

$$C_x = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{\Delta G_3}{\Delta R_4}} \left(1 + \frac{C_{35}}{C_2}\right)$$

avec, comme précédemment,

$$\Delta G_3 = \frac{1}{R_3^{(2)}} - \frac{1}{R_3^{(1)}} \quad \text{et} \quad \Delta R_4 = R_4^{(2)} - R_4^{(1)}.$$

DONNÉES EXPÉRIMENTALES

On a contrôlé, sur un montage expérimental, l'intérêt des deux procédés de mesure décrits ci-dessus en utilisant une fréquence de 1 000 Hz obtenue à partir de la fréquence étalon de l'I.M.M.

L'indicateur d'équilibrage du pont était constitué par un oscilloscope cathodique précédé d'un filtre à bande passante étroite.

Des séries de mesures ont été effectuées en différentes saisons au cours de deux années (1963 et 1964).

Le 1^{er} équilibrage du pont était effectué à l'aide d'un condensateur variable et d'un variomètre monté en série avec la bobine L_4 . Pour contrôler et réduire l'influence des variations de la température de l'air dues au changement des conditions climatiques, on a d'abord utilisé une bobine en fil de cuivre, puis une bobine en fil de manganine. On a déterminé la capacité de condensateurs à diélectrique de mica de 4×10^5 pF; ces condensateurs ne servent d'ailleurs que d'intermédiaires indispensables lors de la détermination absolue des condensateurs à air de 1×10^6 pF qui constituent le groupe étalon primaire du farad de l'I.M.M.

Les résistances R_3 et R_4 étaient constituées par des fils enroulés sur des lames suivant la technique Ayrton-Perry. Aucun dispositif thermostatique n'existait pour maintenir constante la température des éléments de l'installation.

Les valeurs des éléments constitutifs du pont sont données dans le tableau I.

TABLEAU I
Données expérimentales moyennes relatives aux caractéristiques du pont en T

Date des mesures	Résistance du bras R_4		Conductance du bras G_3		Précision d'ajustage des capacités des condensateurs C_1 et C_2	Précision de réglage du condensateur variable $\left(\frac{\Delta C}{C}\right)$	C_{35} (pF)
	minimale	maximale	minimale	maximale			
Mai-juin 1963	100,008 ₃	500,493 ₄	$\frac{1}{259,163_8}$	$\frac{1}{156,552_0}$	$0 < \frac{\Delta C}{C} < 3,6 \times 10^{-5}$	$\leq 3 \times 10^{-5}$	6-8
Oct. 1963 - fév. 1964.	100,007 ₃	500,471 ₆	$\frac{1}{259,066_8}$	$\frac{1}{156,522_6}$	$0 < \frac{\Delta C}{C} < 8,3 \times 10^{-4}$		

Note. — Les erreurs quadratiques moyennes des 15 séries (mai-juin) et des 4 séries (octobre-février) ne dépassent pas $1,5 \times 10^{-5}$.

CONCLUSION

La théorie laissait prévoir et l'expérience a confirmé que la méthode exposée ci-dessus peut servir sans difficulté particulière à déterminer, à des fréquences voisines de 1 000 Hz, la capacité de condensateurs de valeurs comprises entre 10^4 et 10^6 pF, avec une précision de 1×10^{-5} . L'analyse théorique montre même qu'en observant certaines précautions expérimentales et en tenant compte de la complexité du terme correctif on pourrait obtenir une précision meilleure que 1×10^{-5} .

Réciproquement, si l'on utilise la méthode en partant d'un condensateur dont la capacité est connue en valeur absolue par le calcul, on peut déterminer la valeur d'une résistance en fonction des unités de fréquence et de capacité.

(Mai 1965)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] TUTTLE (W.), Bridges-T and parallel-T nul circuits for measurements at radio-frequencies, *Proc. I.R.E.*, **28**, 1940, p. 23.
 - [2] КРОТКОВ (I.), Nouvelles méthodes et appareils pour les mesures précises d'inductance et de capacité, 1960.
-

ANNEXE 10

Un condensateur transportable amélioré de 10 pF

Par R. D. CUTKOSKY et L. H. LEE

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

Dans un précédent rapport [1], nous avons décrit un condensateur à diélectrique en silice fondue. Nous prévoyions à cette époque que des condensateurs de ce modèle pourraient être employés par les laboratoires pour comparer les unités nationales de capacité, à condition cependant de limiter la différence de potentiel appliquée aux bornes des condensateurs à une valeur faible (10 V) et de ne pas les soumettre à de sévères chocs mécaniques. Les résultats de telles comparaisons entre laboratoires ont été présentés dans un autre rapport [2].

Les défauts du prototype — faible différence de potentiel acceptable et sensibilité aux chocs — ont été étudiés ultérieurement; il en est résulté un modèle perfectionné qui semble être exempt de ces deux inconvénients [3]. Les valeurs de la capacité de dix condensateurs de ce nouveau modèle ont été mesurées sous 100 et 200 V; entre ces deux tensions, la plus grande variation observée sur la capacité a été de 12×10^{-9} . Les condensateurs terminés ont été éprouvés pour leur résistance aux chocs en les laissant tomber de hauteurs variables (jusqu'à 20 cm) et sous différents angles d'impact sur une table en bois dur; la plus grande variation de capacité observée a été de 1×10^{-7} . Un instrument fut envoyé par paquet poste aérienne au laboratoire d'électricité du Conseil National de Recherches du Canada et comparé à un autre instrument transporté à la main au même laboratoire. La variation relative entre les deux condensateurs n'a pas dépassé 2×10^{-7} .

Un groupe de onze de ces nouveaux condensateurs a été observé pendant plusieurs mois; aucun condensateur n'a montré une variation supérieure à 2×10^{-7} par rapport à la moyenne du groupe. Bien que de plus amples informations soient nécessaires pour évaluer en définitive la fiabilité

de ces nouveaux condensateurs en silice fondue, les résultats déjà acquis permettent d'espérer une stabilité de quelques 10^{-7} ; de tels condensateurs devraient supporter sans dommage les manipulations normales dues aux transports entre les laboratoires.

(Avril 1965)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CUTKOSKY (R. D.) et LEE (L. H.), Construction et comportement d'un condensateur transportable de dix picofarads, *Comité Consultatif d'Électricité*, 10^e session, 1963, p. 44.
 - [2] DUNN (A. F.), Comparaison internationale d'un étalon de 10 pF, *Comité Consultatif d'Électricité*, 10^e session, 1963, p. 49.
 - [3] CUTKOSKY (R. D.) et LEE (L. H.), Improved 10 picofarad fused silica dielectric capacitor, *J. Res. N.B.S.*, 69C, 1965, p. 173.
-

ANNEXE 11

Autodétermination des inductances parasites du pont à diviseur inductif utilisé pour la comparaison d'étalons d'inductance

Par E. ARRI et E. CHIUSANO

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris (Italie)

Lorsqu'on veut déduire les valeurs des inductances d'une série d'étalons (de 1 H à 100 μ H) formant une progression géométrique de raison 10, de l'inductance de l'étalon (10 mH) qui se trouve au milieu de la série, on peut exécuter les comparaisons successives de deux étalons, dont les inductances sont dans les rapports 10/1 ou 1/10 au moyen d'un pont en courant alternatif à diviseur de tension (fig. 1). Un pont de ce type est tout à fait autonome; en effet, il permet de déterminer ses propres inductances parasites par un nombre convenable d'équilibrages auxiliaires.

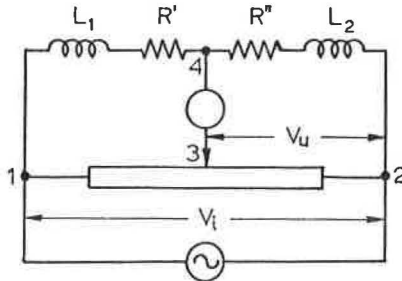


Fig. 1. — Pont en courant alternatif à diviseur de tension pour la comparaison d'inductances.

Une méthode pour la mesure des inductances des connexions seules est bien connue pour les ponts à diviseur de tension du type résistif [1, 2]. Cependant, ces dernières années les diviseurs résistifs ont été peu à peu

remplacés par les diviseurs du type inductif qui présentent une haute stabilité intrinsèque, une résolution élevée et une meilleure linéarité.

Au moyen d'un tel diviseur inductif, si le rapport V_u/V_i est égal au rapport S entre les nombres de spires des sections 3-2 et 1-2 du diviseur, et si l'on néglige les paramètres parasites des bras 1-4 et 4-2, on obtient à l'équilibre, en agissant sur S , R' ou R'' :

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{1 - S}{S} = \frac{R'}{R''}.$$

En utilisant les diviseurs inductifs disponibles actuellement, on peut obtenir le rapport des inductances $L_1/L_2 = 10$ de deux étalons non seulement avec une précision de $\pm 0,01\%$ [3] mais même d'au moins $\pm 0,001\%$, aussi bien pour des étalons L_2 de valeur plus petite. Il suffit de tenir compte non seulement des inductances parasites l' et l'' (de l'ordre de 1 à 2 μH) des bras 1-4 et 4-2, mais aussi de l'angle de déphasage ε du diviseur (positif si V_u est en avance sur V_i).

Les inductances parasites schématisent les effets des flux couplés avec les mailles du pont; c'est pourquoi au cours des mesures auxiliaires, qui permettent de déterminer ces paramètres parasites, il faut garder inaltérée la configuration des éléments du pont qu'on emploie pour la détermination des rapports L_1/L_2 .

On peut trouver actuellement des diviseurs de tension inductifs qui, pour des valeurs de $S \geq 0,1$, présentent un rapport $\varepsilon/\omega < 1 \times 10^{-8}$ s, c'est-à-dire qui introduisent un déphasage ε inférieur à 0,05 mrad à 1 000 Hz. En employant un tel diviseur le pont schématisé sur la figure 1 donne à l'équilibre :

$$(1) \quad \frac{L_1}{L_2} = \frac{1 - S}{S} + \frac{1 - S l''}{S L_2} - \frac{l'}{L_2} - \frac{\varepsilon}{\omega} \frac{R' + R''}{L_2}.$$

Les paramètres parasites ont une influence d'autant plus grande que la valeur de L_2 est plus petite; dans le cas, par exemple, où $L_1 = 1$ mH et $L_2 = 100$ μH on voit que pour déterminer L_1/L_2 avec la précision indiquée de $\pm 0,001\%$, il faut connaître l'' à $\pm 0,0005$ μH et l' avec une précision 10 fois moindre, c'est-à-dire à $\pm 0,005$ μH , tandis qu'il suffit de connaître ε à $\pm 5\%$.

On a réussi à obtenir une précision de cet ordre en employant, pour la comparaison d'étalons d'inductance, un pont à diviseur inductif dont le schéma de principe est donné à la figure 2, et en exécutant successivement plusieurs mesures comme on l'indique ci-dessous.

Les écrans et le dispositif de mise à la terre de Wagner suppriment l'effet des capacités parasites qui se placeraient en parallèle sur les deux sections du diviseur et modifieraient la valeur du déphasage ε .

Les inductances L_1 et L_2 ($L_1/L_2 = 10$) représentent les étalons à comparer, R_1 et R_2 leur résistance. La résistance variable à décades R , d'inductance résiduelle variable l_R , et la résistance à fil r à prise de potentiel servent à réaliser, conjointement avec la variation de S , l'équilibrage du pont. l_1 , l_2 et r_1 , r_2 représentent les inductances et les résistances totales des conducteurs de connexion à L_1 et L_2 . P et Q sont des résistances variables (P à fil, Q à décades) dont les inductances résiduelles l_P et l_Q sont constantes: elles sont introduites seulement dans les équilibres auxiliaires pour la mesure des inductances parasites.

Dans l'utilisation normale du pont pour comparer deux étalons d'inductance L_1 et L_2 , P et Q sont mises en court-circuit; on a alors dans (1) :

$$l' = l_1 + l_R + l'_r, \quad l'' = l_2 + l''_r;$$

$$R' + R'' = R_1 + R_2 + R + r_1 + r_2 + r.$$

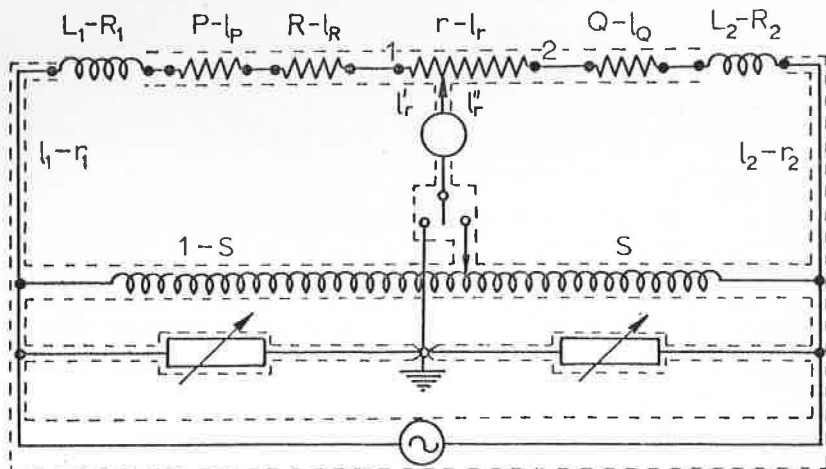


Fig. 2. — Réalisation effective du pont pour la comparaison d'étalons d'inductance.

Si l'on dispose convenablement la résistance à fil r pour que la position du curseur reste toujours dans la partie centrale du fil, on peut admettre conventionnellement, dans les limites de précision désirées, que les inductances résiduelles l'_r et l''_r de r , respectivement en série avec L_1 et L_2 , dépendent de l'inductance totale l_r de r et qu'elles sont des fonctions linéaires de la position du curseur; il suffit donc de connaître l'inductance l_r de r .

Les configurations à donner au pont pour déterminer l_1 , l_2 , l_R et l_r sont indiquées dans le tableau I. Pour ces équilibrages auxiliaires on emploie deux étalons d'inductance de $100 \mu\text{H}$ et $10 \mu\text{H}$: il suffit qu'ils soient connus à $\pm 0,01 \mu\text{H}$ pour que les valeurs des inductances parasites ne dépassent par les ordres de grandeur indiqués plus haut.

TABLEAU I

Configurations du pont permettant l'autodétermination des inductances parasites

Équi- librage	Éléments					Position du curseur de r	Éléments réglables pour obtenir l'équilibre
	L_1	L_2	R	P	Q		
<i>a</i>	cc	cc	cc	cc	cc	intermédiaire	S, r
<i>b</i>	$100 \mu\text{H}$	cc	R_b	cc	cc	intermédiaire	S, R, r
<i>c</i>	cc	$10 \mu\text{H}$	R_b	cc	Q_c	intermédiaire	S, Q, r
<i>d</i>	cc	cc	cc	cc	Q_d	intermédiaire	S, Q, r
<i>e</i>	$10 \mu\text{H}$	cc	R_e	P_e	cc	extrémité 1	S, R, P
<i>f</i>	$10 \mu\text{H}$	cc	R_e	P_f	cc	extrémité 2	S, P

cc = en court-circuit.

Les deux premiers équilibrages suffisent pour évaluer les inductances l_1 et l_2 des connexions, si l'on suppose connues l_R et l_r . Les équations d'équilibre sont du type (1); par exemple, pour l'équilibrage a on obtient :

$$(2) \quad l_1 + l'_{ra} = \frac{1 - S_a}{S_a} (l_2 + l''_{ra}) - \frac{\varepsilon_a}{\omega} (r_1 + r_2 + r).$$

Les équilibrages c et d permettent de déterminer, si l'on connaît l_1 , l_2 et l_r , l'inductance résiduelle l_R qui correspond à une valeur quelconque R_b de la résistance R .

L'ensemble des équations du type (1) des quatre premiers équilibrages détermine au contraire les inductances l_1 et l_2 , une fois connue l'inductance l_r .

Au moyen des six équilibrages auxiliaires on peut déterminer l_1 et l_2 , indépendamment de l_R et l_r .

Les deux derniers équilibrages permettent de déterminer l_r en fonction de l_2 . On remarque même que la résistance r équivaut, pour un équilibrage quelconque du pont, à une résistance mise en série avec L_2 ; il en résulte une remarquable simplification de l'équation (1). On peut exprimer la résistance et l'inductance de l'ensemble en fonction soit de la résistance r et de l_2 , soit des valeurs prises par S au cours des deux derniers équilibrages auxiliaires, soit encore de la valeur de S et de la position du curseur de r correspondant à l'équilibrage considéré.

Dans les équations d'équilibre du type (2) il suffit de connaître le déphasage ε pour les différentes valeurs de S avec une précision de $\pm 5\%$ si $\varepsilon/\omega \leq 10^{-8}$ s. Ces conditions sont suffisantes même dans le cas le plus défavorable pour le déphasage du diviseur (équilibrage b où $(1 - S)/S = 50$ à 100), à la fréquence $f = 1\,000$ Hz connue à $\pm 1\%$ seulement, et lorsque les résistances qui interviennent dans les équilibrages auxiliaires ne sont elles-mêmes connues qu'à 1% près.

(Avril 1965)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] RAYNER (G. H.), The calibration of inductors at power and audio frequencies, *Proceedings I.E.E.*, **106**, 1959, part C, p. 38.
- [2] RAYNER (G. H.), The derivation of resistance, inductance, and capacitance from the N.P.L. primary standard of mutual inductance, *I.R.E. Trans. on Instrumentation*, **I-7**, 1958, p. 212.
- [3] HILLHOUSE (D. L.) et KLINE (H. W.), A ratio transformer bridge for standardization of inductors and capacitors, *I.R.E. Trans. on Instrumentation*, **I-9**, 1960, p. 251.

ANNEXE 12

A propos de l'équilibrage du pont de Maxwell dans la comparaison entre étalons d'inductance et de capacité

Par C. CHIODI

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris (Italie)

A la suite de quelques observations que j'ai reçues au sujet de ma Note présentée au Comité Consultatif d'Électricité en 1961 [1], je pense utile de préciser que la résistance R qui figure dans les formules (1) et (2) de cette Note et qui représente la résistance effective du bras LR du pont à l'équilibre et à la fréquence de mesure, peut être aisément calculée, si elle n'est pas connue, d'après la formule :

$$(a) \quad R = \frac{PS}{Q} + PS\omega^2 \left[K_p(K_s + K)R + K_p \frac{L}{S} + (K_s + K) \frac{L}{P} \right].$$

Comme le terme $K_p(K_s + K)R$ est négligeable en comparaison des deux suivants, on peut écrire plus simplement :

$$(b) \quad R = \frac{PS}{Q} + PS\omega^2 \left[K_p \frac{L}{S} + (K_s + K) \frac{L}{P} \right].$$

Pour les valeurs plus élevées de l'inductance L et à 1 000 Hz, le deuxième terme du second membre est du même ordre de grandeur que le premier terme PS/Q qui, par conséquent, n'est pas suffisant seul pour calculer R .

Compte tenu de la petitesse du terme correctif contenant R dans la formule (2) de la Note précitée :

$$L = CPS - R[K_pP + (K_s + K)S],$$

on peut calculer R sans erreur appréciable à partir de la formule (b) en utilisant les valeurs nominales de P , S et L et en prenant pour Q la valeur obtenue à l'équilibre avec une approximation d'au moins ± 1 pour cent.

(4 mai 1965)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CHIODI (C.), Équilibrage du pont de Maxwell dans la comparaison entre étalons d'inductance et de capacité, *Comité Consultatif d'Électricité*, 9^e session, 1961. p. 94.
-

Sur la stabilité à long terme des diodes de Zener étalons

Par W. G. EICKE Jr et H. H. ELLIS

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

Le National Bureau of Standards poursuit une étude de la stabilité à long terme des diodes de Zener sous deux modes de fonctionnement différents. Certaines diodes sont maintenues continuellement sous tension alors que d'autres ne le sont que pendant le temps nécessaire pour effectuer les mesures (5 à 10 minutes), avec des interruptions d'une journée à quatre semaines entre les mesures. Toutes les diodes examinées sont du type à compensation thermique; elles ont des coefficients f.é.m.-température compris entre 1,5 et $10 \times 10^{-6}/\text{deg}$. Cette caractéristique est obtenue en associant la diode de Zener avec une ou plusieurs diodes fonctionnant dans le sens direct, ce qui permet d'obtenir un ensemble ayant un coefficient f.é.m.-température déterminé. Les diodes directes sont choisies de telle sorte que, pour un courant donné, le coefficient positif f.é.m.-température de la diode de Zener soit compensé par le coefficient négatif des diodes directes. Les diodes étaient utilisées avec un courant d'intensité normale de 10 mA.

Le circuit de mesure utilisé dans ces expériences est représenté sur la figure 1 [1]. Les diodes sont placées dans un bain d'huile en agitation et maintenu à 25 °C. Pendant les mesures la température du bain d'huile est réglée à $\pm 0,02$ deg et mesurée à l'aide d'un thermomètre à résistance de platine et d'un pont de Mueller. Le courant d'alimentation des diodes est fourni par un accumulateur au plomb de 80 V; son intensité est ajustée à l'aide de la résistance réglable R_1 . La valeur du courant est déterminée en mesurant, à l'aide d'un potentiomètre d'une précision de 10^{-4} , la chute de tension qu'il produit aux bornes d'une résistance étalon de 10 Ω placée dans un bain d'huile à température contrôlée. Les connexions utilisées pour la mesure du courant sont représentées sur la figure 1 par des tirets. La tension de la diode est mesurée par la méthode d'opposition à l'aide du circuit figuré par les lignes pointillées. Un groupe de piles du type non saturé, conservées à $28,00 \pm 0,01$ °C dans un bain d'huile en agita-

tion, est utilisé pour compenser la plus grande partie de la tension Zener; le complément est mesuré à l'aide d'un potentiomètre. Les piles étalons du type non saturé sont étalonnées en les comparant à un groupe de piles du type saturé immédiatement avant et après la mesure de la tension de Zener; la moyenne des deux étalonnages donne la force électromotrice de chaque pile.

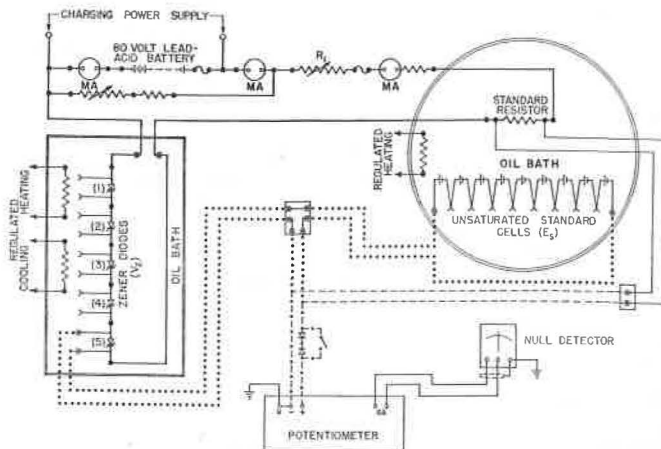


Fig. 1. — Circuit pour l'étude de la stabilité des diodes de Zener.

Un résumé des résultats obtenus sur un groupe de trente diodes maintenues continuellement sous tension a été donné dans un rapport présenté au C.C.E. en 1963 [2]. Sur ces trente diodes on a constaté qu'un certain nombre d'entre elles étaient restées très stables après avoir vieilli sous tension. On a étudié également un groupe de diodes mises sous tension par intermittence, c'est-à-dire seulement pendant la durée des mesures (5 à 10 minutes), les intervalles entre les mesures pouvant varier d'une journée à quatre semaines. Les variations de la tension Zener en fonction du temps, à partir de la mesure initiale, sont représentées sur les figures 2 et 3; la figure 2 correspond à trois diodes maintenues continuellement sous tension; la figure 3 correspond aux diodes utilisées par intermittence. Pour les diodes maintenues continuellement sous tension, les premiers résultats de l'étude de la stabilité (1961 à décembre 1962) n'ont pas été retenus, ces diodes ayant été soumises alors à des conditions de fonctionnement variables [2]; bien entendu elles vieillissaient pendant cette période. Les ordonnées donnent la variation totale en 10^{-6} depuis le moment où les diodes ont été soumises aux essais; elles permettent donc d'évaluer la variation de la tension pendant la période de vieillissement des diodes.

En utilisant les résultats des figures 2 et 3, on a calculé pour chaque diode l'écart-type s_m d'une seule mesure de la tension, en négligeant la dérive dans le temps; cet écart est donné au tableau I, colonne 5. L'erreur totale de la mesure, représentée par s_m , a deux causes: l'une réside dans le procédé de mesure seul, c'est-à-dire dans l'incertitude sur les valeurs des étalons non saturés considérés comme étalons connus, incertitude due aux conditions variables dans lesquelles on les détermine; l'autre réside dans les variations des diodes elles-mêmes.

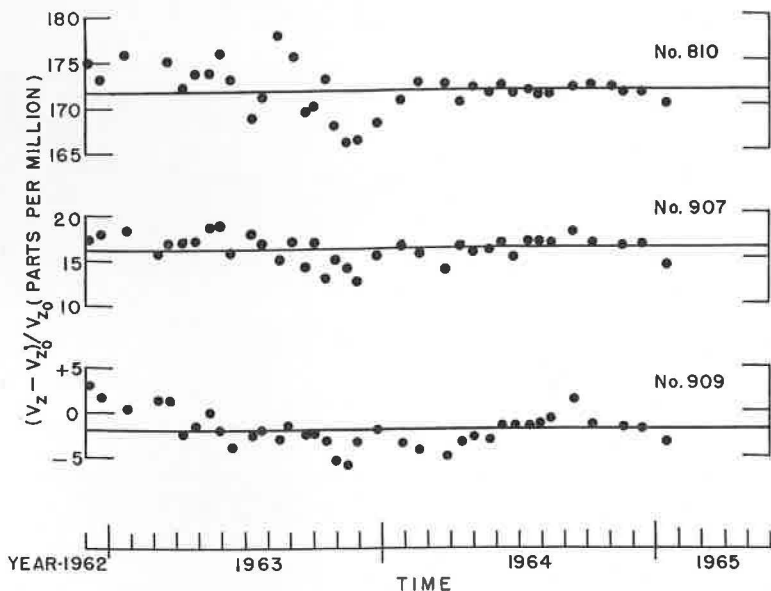


Fig. 2. — Courbes de la stabilité de trois diodes de Zener maintenues continuellement sous tension.

Valeurs corrigées à 25,00 °C et 10,000 mA. Les ordonnées indiquent la variation totale de la tension à partir de la mesure initiale.

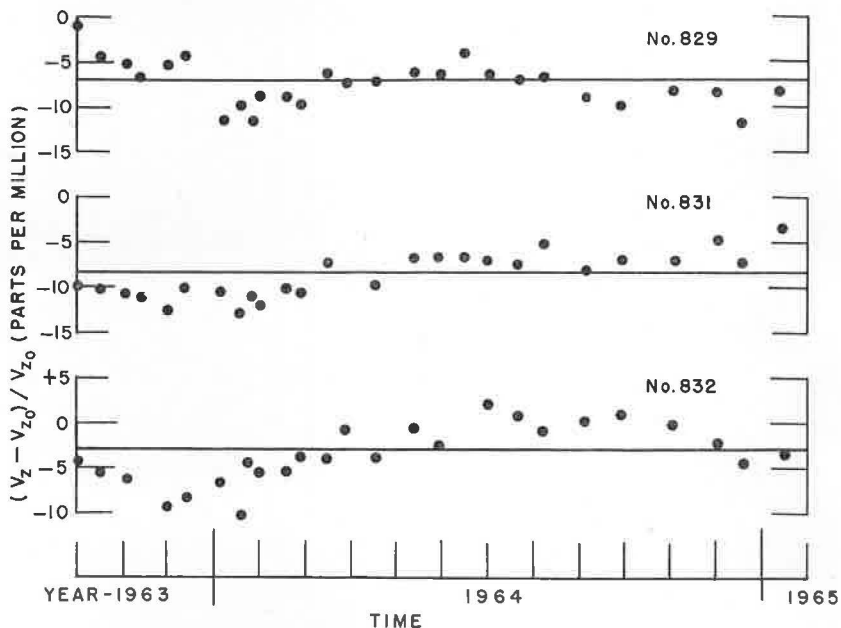


Fig. 3. — Courbes de la stabilité de trois diodes de Zener maintenues sous tension par intermittence.

Valeurs corrigées à 25,00 °C et 10,000 mA. Les ordonnées indiquent la variation totale de la tension à partir de la mesure initiale.

TABLEAU I

Données complémentaires sur les diodes de Zener des figures 2 et 3

Diode N° (1)	Tension initiale (V) (2)	Date du commencement de l'étude (3)	Nombre de mesures (4)	Écart-type (s_m) (5)	Écart-type (s_s) (6)	Écart-type (s_d) (diode) (7)
810	8,164 889	7/8/61	37	$2,6 \times 10^{-6}$	$0,7 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-6}$
907	9,183 122	14/4/61	37	1,5	0,6	1,4
909	9,227 519	10/4/61	37	2,0	0,6	1,9
829	8,432 930	6/9/63	27	3,6	2,1	2,9
831	8,390 067	6/9/63	26	3,0	2,1	2,2
932	8,480 207	6/9/63	25	2,6	2,1	1,5

Notes. — a) Écart-type d'une seule mesure, déterminé d'après les valeurs des figures 2 et 3.

b) Écart-type résultant de l'incertitude des piles étalons et du potentiomètre.

c) $s_d^2 = s_m^2 - s_s^2$.

L'erreur due à la première cause, désignée par s_s (tableau I), a été estimée pour chaque diode en tenant compte des résultats des étalonnages des piles étalons du type non saturé et des résultats fournis par une expérience indépendante [3]. Les différences entre les résultats de 90 étalonnages semblables ont conduit à un écart-type de $0,56 \times 10^{-6}$ pour la valeur de la force électromotrice opposée à la tension Zener, cette valeur étant, comme on l'a déjà signalé, la moyenne des résultats des deux étalonnages faits aussitôt avant et après la mesure de la tension Zener. L'expérience indépendante poursuivie pendant deux ans a montré que les écarts-types dépendaient du domaine de mesure utilisé sur le potentiomètre et de la tension des diodes; ces écarts varient donc d'une diode à l'autre. En combinant les écarts-types relatifs à l'étalonnage des piles étalons et au potentiomètre on obtient les écarts-types s_s (tableau I, colonne 6).

L'écart-type s_d attribuable uniquement aux variations erratiques de la tension de la diode est alors donné par l'expression $s_d = (s_m^2 - s_s^2)^{1/2}$; sa valeur, indiquée pour plusieurs diodes dans la colonne 7 du tableau I, permet d'estimer la stabilité de la diode dans l'intervalle de temps indiqué sur les figures 1 et 2. Il apparaît que dans la valeur de s_d , $0,2$ à 1×10^{-6} doit provenir de l'agitation du bain d'huile.

Les résultats ci-dessus montrent que les diodes de Zener stables sont utilisables comme étalons de force électromotrice de travail de haute qualité sans nécessiter de fréquents étalonnages, qu'elles soient mises sous tension en permanence ou par intermittence. Bien que les diodes fabriquées actuellement ne soient pas aussi stables que les piles étalons du type saturé, on a cependant constaté qu'elles avaient une stabilité de 3 à 10×10^{-6} sur une période de trois ans. Il y a de fortes raisons de croire que cette stabilité sera la même pour des durées bien plus longues et que, dans des conditions de fonctionnement améliorées, des stabilités à long terme de 1×10^{-6} pourront être obtenues. Les résultats présentés ici suggèrent également l'emploi des diodes de Zener comme étalons de transfert de force électromotrice entre les laboratoires. Il est également intéressant de noter que les résultats obtenus au N.B.S. sur la stabilité de diodes mises sous tension par intermittence sont en bon accord avec les résultats obtenus par F. Melchert à la Physikalisch-Technische Bundesanstalt [4].

(Avril 1965)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] EICKE (W. G.), The operating characteristics of Zener reference diodes and their measurement, *I.S.A. Transactions*, 3, N° 2, 1964, pp. 93-99.
- [2] EICKE (W. G.), Commentaires sur l'utilisation des diodes de Zener comme étalons de tension, *Comité Consultatif d'Électricité*, 10^e session, 1963, p. 27.
- [3] EICKE (W. G.), ELLIS (H. H.) et COHEN (B. A.), Zener diodes as a standard of electromotive force (à paraître).
- [4] MELCHERT (F.), Étude de diodes de Zener sur une longue période et leur emploi comme étalon de tension transportable, *Comité Consultatif d'Électricité*, 10^e session, 1963, p. 23.

Rapport sur l'utilisation des diodes de Zener comme étalons de tension

Par W. SCHLESOK

Deutsches Amt für Messwesen und Warenprüfung (Allemagne)

Conformément à la recommandation du Comité Consultatif d'Électricité en 1963 [1], les techniciens du D.A.M.W. ont entrepris en 1964 la réalisation d'étalons de tension à diodes de Zener, compensés pour les variations de température, et qui aient des propriétés analogues à celles des piles étalons. Deux montages constitués d'un pont précédé d'un étage d'entrée [2] (fig. 1) ont été construits; chaque montage utilise quatre diodes dont

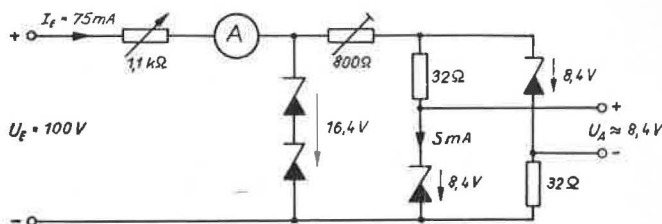


Fig. 1. — Montage en pont avec étage d'entrée.

les caractéristiques sont les suivantes: tension Zener 8,4 V, courant Zener 5 mA, résistance différentielle 32 Ω et 23 Ω , coefficient de température maximal $\pm 8 \times 10^{-6}$ /deg. Un dispositif d'alimentation stabilisée fournit la tension d'entrée; ce dispositif peut d'ailleurs être remplacé par une pile. L'étage d'entrée est formé par une combinaison de diodes de Zener de puissance possédant une faible résistance interne. Le pont proprement dit est placé dans un bain de pétrole thermorégulé. L'un des montages fonctionne uniquement comme source de tension, l'autre est conçu pour débiter un courant de charge de 2 mA. Le procédé de mesure est le suivant: la tension de sortie U_A à mesurer est opposée à une tension

connue, obtenue en montant en série des piles étalons; la différence entre ces deux tensions est mesurée avec un compensateur.

La figure 2 montre la variation relative de la tension de sortie U_A en fonction de l'intensité du courant d'entrée I_E de l'ensemble du dispositif, avec et sans charge. Une variation de I_E de $\pm 12\%$, correspondant à une variation de la tension d'alimentation de $\pm 10\%$, n'entraîne qu'une baisse de la tension de sortie inférieure à 3×10^{-7} sans charge et à 4×10^{-7} avec charge. Des variations de courant de $\pm 20\%$ entraînent des baisses de tension de 1×10^{-6} . Le facteur de stabilisation du montage est ainsi supérieur à 300 000. Les coefficients de température de la tension de sortie à 25°C atteignent environ $-1 \times 10^{-6}/\text{deg}$ sans charge et $-2 \times 10^{-6}/\text{deg}$ avec charge.

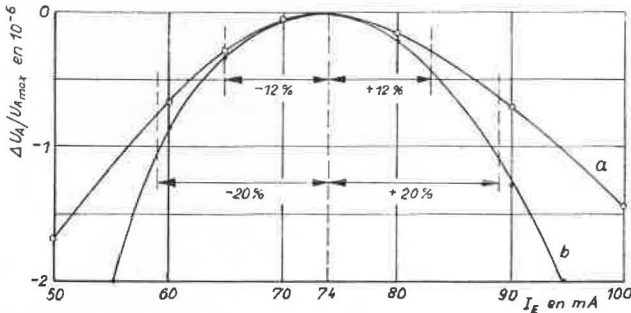


Fig. 2. — Variation relative de la tension de sortie U_A en fonction du courant d'entrée I_E .
a, sans charge; *b*, avec charge.

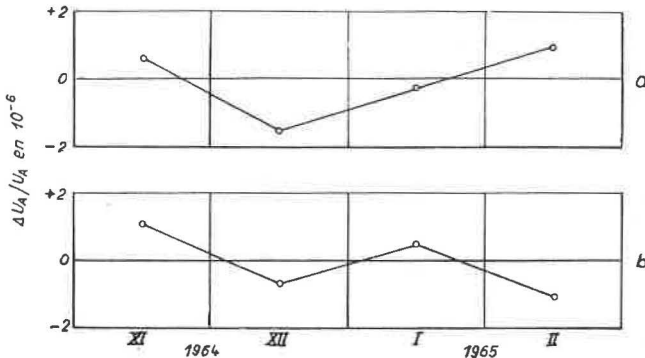


Fig. 3. — Variation relative de la tension de sortie U_A en fonction du temps.
a, sans charge; *b*, avec charge.

L'observation de la stabilité dans le temps porte jusqu'à présent sur quatre mois. La figure 3 représente la variation relative de la tension de sortie U_A du pont avec charge et celle du pont sans charge, en fonction du temps. La température durant les mesures était de 25°C et entre les

mesures de 20 °C. Dans l'intervalle des quatre mois, la variation relative de la tension de sortie des deux montages en pont fut inférieure à $\pm 2 \times 10^{-6}$, sans qu'il soit possible de mettre en évidence un sens de variation. Cette variation peut être due à des différences de la température ambiante du bain dans lequel sont plongées les piles étalons entre le moment de leur étalonnage individuel et le moment de la comparaison de la tension Zener à la somme de ces piles. Les mesures de stabilité sont poursuivies en régime intermittent et en régime continu des diodes. La construction d'autres montages en pont, ayant le cas échéant des tensions de sortie différentes, est prévue. Après l'achèvement de certaines recherches sur la stabilité à long terme, on a l'intention d'envoyer un ou plusieurs dispositifs au Bureau International pour qu'ils y soient observés.

(Avril 1965)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *Comité Consultatif d'Électricité*, 10^e session, 1963, Recommandation E2, p. 13.
 - [2] MELCHERT (F.), Brückenschaltung mit Zenerdioden zur Erzeugung von Gleichspannungen hoher Konstanz, *E.T.Z.*, A84, 1963, p. 277.
-

ANNEXE 15

Étalon de tension transportable à diode de Zener; essai de réalisation

Par P. JEANGUENIN et P. KOCH
Bureau Fédéral des Poids et Mesures (Suisse)

D'après les résultats de travaux publiés jusqu'ici (par exemple ceux de K. Enslein, F. Melchert, W. Eicke, S. Deike) les diodes de Zener placées dans des conditions de fonctionnement bien stables présentent des dérivées linéaires de leur tension de sortie d'environ $-(0 \dots 20) \times 10^{-6}/\text{an}$ et des variations aléatoires de cette tension d'environ $\pm (2 \dots 3) \times 10^{-6}$. Ces résultats seront sans doute améliorés au cours des années à venir.

Un système étalon comprenant une référence de Zener, à condition qu'il soit suffisamment petit et que sa source d'alimentation soit incorporée, pourrait être envoyé facilement par colis aérien d'un laboratoire à l'autre. Cette opération étant simple et pouvant être répétée, il semble que l'application de méthodes statistiques permettraient des comparaisons avec une incertitude de $(1 \dots 2) \times 10^{-6}$ sur quelques mois.

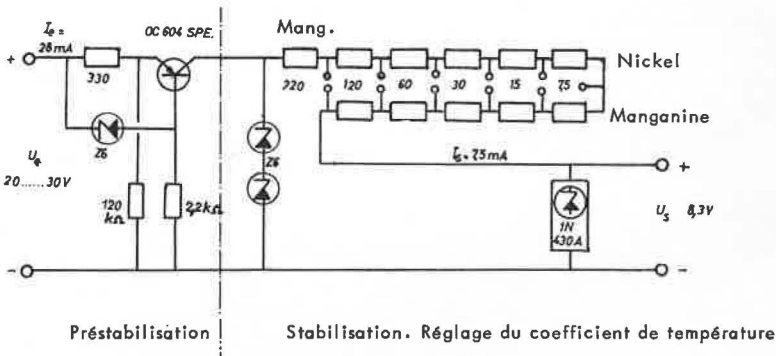


Fig. 1. — Circuit de l'étalon de tension transportable à diode de Zener.

Nous avons entrepris la construction d'un tel système de transfert (fig. 1 et 2) et étudié l'influence de la température et de la tension d'alimentation sur sa tension de sortie. Une variation de la température de 20 °C à 25 °C ou de la tension d'alimentation de 19,5 à 29 V ont provoqué une variation maximale de la tension de sortie (8,4 V) de 30 μ V et de 50 μ V respectivement, ce qui correspond à $7 \times 10^{-7}/\text{deg}$ et à $7 \times 10^{-7}/\text{V}$.

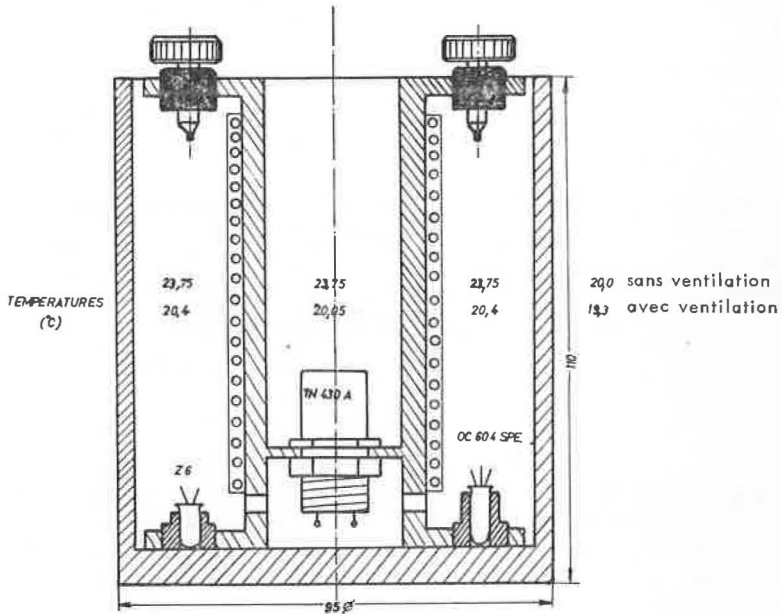


Fig. 2. — Étalon de tension transportable à diode de Zener.
(Masse de l'appareil : 1 kg environ.)

La faible puissance d'alimentation exigée (0,5 à 0,9 W) est un avantage important car, lors du transport de l'appareil en fonctionnement, l'emballage et l'isolation thermique empêchent l'évacuation de la chaleur dégagée, ce qui provoque une élévation de température. De plus, une faible consommation facilite la technique d'alimentation. La puissance mentionnée ci-dessus pourrait être encore réduite par l'utilisation d'autres types de diodes de Zener. Nous sommes d'avis que des essais dans cette direction devraient être entrepris.

Les auteurs remercient P. Fehlmann, qui a construit l'appareil et J.-M. Parel, qui l'a ajusté et contrôlé.

(4 mai 1965)

**Convertisseurs thermiques
utilisés comme étalons de transfert
courant alternatif — courant continu
pour la mesure des intensités
et des tensions en courant alternatif**

Par F. L. HERMACH

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

Les techniques en courant alternatif sont utilisées pour déterminer l'ohm à partir d'une capacité ou d'une inductance calculables. En principe, la balance de courant servant à déterminer l'ampère pourrait aussi s'employer en courant alternatif. Cependant, les étalons électriques les plus stables sont encore les piles étalons, ainsi que les résistances de 1Ω qui ne sont pas habituellement prévues pour être utilisées en courant alternatif. Aussi, les mesures en courant alternatif d'intensité et de tension ont-elles été, en pratique, fondées sur des étalons de transfert, ou comparateurs, courant alternatif — courant continu (c.a.-c.c.). Ces étalons de transfert sont traditionnellement des instruments électrostatiques ou électrodynamiques conçus pour avoir la même constante de couple, que l'on applique une différence de potentiel ou une intensité alternatives ou continues, ce qui permet leur utilisation dans un domaine de fréquences plus grand que celui d'instruments tels que la balance de courant qui doit avoir une constante de couple calculable. Plus récemment on a utilisé des instruments électrothermiques, tels que les étalons de transfert à thermocouple et les ponts à bolomètre. Ces trois types d'appareils ont été mis au point dans les laboratoires nationaux de nombreux pays pour mesurer, avec une précision de 10^{-4} , les courants alternatifs aux basses fréquences en les comparant à des étalons à courant continu [1]. Ils présentent un certain nombre d'avantages par rapport aux potentiomètres à courant alternatif (qui doivent aussi comporter un instrument de transfert).

Pour déterminer avec cette précision les différences entre les valeurs des étalons de transfert employés en c.a. et en c.c., il est nécessaire d'effectuer dans chaque cas une étude théorique minutieuse des principes de base utilisés et des imperfections qui pourraient provoquer des différences de réponse de l'appareil en c.a. et en c.c., et d'établir un programme de comparaisons expérimentales soignées des différents étalons pour déceler les erreurs insoupçonnées.

Les progrès récents dans le domaine des amplificateurs opérationnels et des diviseurs de tension à induction ont conduit à la fabrication d'alimentations en courant alternatif d'une linéarité et d'une stabilité d'un jour à l'autre meilleures que 10^{-4} , ce qui nécessite une plus grande précision des étalons de transfert. D'autres réalisations nécessitent l'emploi d'étalons de transfert meilleurs et un certain nombre de laboratoires ont commencé les études nécessaires pour parvenir à ce résultat. A ce degré de précision, les instruments de transfert traditionnels du type électrodynamique sont limités aux fréquences industrielles et les instruments du type électrostatique sont limités vers les basses tensions. Pour obtenir une précision de 10^{-5} ou mieux il faudrait munir ces deux types d'instruments de nouveaux dispositifs de lecture. Ceci pourrait être fait en mesurant la capacité dans le cas des instruments électrostatiques, et l'inductance mutuelle dans le cas des instruments électrodynamiques, ces deux grandeurs étant fonction des déviations du système mobile. Cependant une difficulté majeure demeurerait, celle des vibrations produites par des forces extérieures ou par les variations cycliques du couple créé par le courant alternatif. L'expérience a montré qu'il était souvent difficile de contrôler les couples parasites produits par de faibles résonances mécaniques. Il est très possible que l'utilisation d'un système mobile flottant dans un liquide de même densité réduise ces difficultés. Les perfectionnements des convertisseurs thermiques (instruments à thermocouples) ont cependant semblé les plus prometteurs au National Bureau of Standards pour la réalisation d'étalons de transfert c.a.-c.c. avec une exactitude de 2×10^{-5} ou mieux. La suite de ce rapport souligne les progrès réalisés dans cette voie au N.B.S.

Un thermoélément, ou convertisseur thermique, est constitué d'un filament de chauffage et d'un thermocouple. Le filament est généralement un fil métallique court suspendu entre les deux entrées de courant dans une ampoule vide d'air; ce filament est chauffé par le courant. La soudure chaude du thermocouple est fixée au milieu du filament, et isolée électriquement. La différence de potentiel d'origine thermoélectrique (environ 10 mV pour une intensité déterminée) fournit une mesure du courant de chauffage. La résistance du filament d'un thermoélément du type 10 mA est d'environ 25 Ω . La faible chute de tension et la faible réactance permettent l'emploi de shunts et de résistances montées en série pour atteindre au moins 20 A et 1 000 V, avec de faibles erreurs en courant alternatif de basse fréquence et en courant continu.

Des études faites au N.B.S. et au N.P.L. ont montré que les seules différences notables de réponse observées entre un thermoélément parcouru par un courant continu et le même thermoélément parcouru par des courants de fréquences modérées proviennent des effets Thomson et Peltier dans le filament de chauffage [2], [3]. En courant continu, la température du filament de chauffage dépend faiblement du sens du courant par suite de

ces effets. L'échauffement moyen n'est pas tout à fait le même pour un courant alternatif variant rapidement. Des calculs récents fondés sur la mesure des coefficients de Thomson et Peltier montrent que les erreurs thermoélectriques devraient être inférieures à 10×10^{-6} avec des filaments de manganine ou d'alliages au nickel-chrome tels que « Evanohm » ou « Karma ». Au N.B.S. plusieurs thermoéléments des types 5 et 10 mA munis de tels filaments ont été obtenus récemment de différentes provenances et leurs différences de réponse c.a.-c.c. ont été comparées pour des fréquences variant de 20 Hz à 20 kHz. Par rapport à la moyenne du groupe, aucun thermoélément n'a présenté une différence c.a.-c.c. supérieure à 5×10^{-6} (sauf à 20 Hz); cela est plutôt remarquable étant donné que les effets thermoélectriques de ces alliages sont modifiés aux températures supérieures à 400 °C environ et par écrouissage, et que l'histoire thermique de quelques-uns des thermoéléments durant le dégazage, la soudure des joints, etc. n'est pas connue. De plus, les entrées de courant de plusieurs thermoéléments sont en fer-nickel cuivré dont le coefficient de dilatation thermique est voisin de celui du verre de l'ampoule; le calcul des erreurs dues à l'effet Peltier est par suite imprécis.

Aux basses fréquences, des erreurs supplémentaires proviennent du fait que le filament ne prend pas la moyenne des variations cycliques de la puissance d'entrée. Les différences c.a.-c.c. sont cependant inférieures à 1×10^{-5} pour ces thermoéléments, même à 20 Hz. Aux fréquences élevées, l'effet de peau et les réactances de dispersion produisent aussi des erreurs; des comparaisons ont montré que ces erreurs sont inférieures à 1×10^{-5} , même à 50 kHz.

Des résistances cylindriques constituées par un dépôt métallique, montées chacune dans un cylindre en laiton, sont utilisées au N.B.S. pour les mesures des différences de potentiel en courant alternatif. La résistance appropriée est connectée en série avec le filament d'un thermoélément de telle façon que la force électromotrice thermoélectrique soit fonction de la différence de potentiel appliquée. Le montage est appelé convertisseur thermique de différence de potentiel. Les erreurs résultant de l'effet de peau et de la réactance de chaque résistance peuvent être calculées, au moins grossièrement, par de simples considérations de géométrie, et les calculs peuvent être vérifiés par des comparaisons successives c.a.-c.c. pour des gammes de tension voisines. Par exemple, le thermoélément *A* en série avec la résistance pour 10 V peut être comparé, sous 10 V, au thermoélément *B* en série avec la résistance pour 20 V. Cette dernière combinaison peut être comparée à son tour, sous 20 V, au thermoélément *A* en série avec la résistance pour 30 V. Cette différence de réponse c.a.-c.c. de n'importe quel montage peut alors être définie en fonction d'un seul montage pris comme référence, à condition que chaque valeur soit indépendante de la différence de potentiel appliquée.

La précision de la détermination des différences relatives c.a.-c.c. est due pour une grande part au comparateur à thermocouples (*fig. 1*) qui est utilisé au N.B.S. On applique une différence de potentiel alternative et on rend l'indication du détecteur *D* minimale en ajustant le réseau. Si les deux convertisseurs thermiques de différence de potentiel ont la même différence c.a.-c.c., ce minimum se conservera quand une différence de potentiel continue, égale à la tension efficace du courant alternatif, sera

appliquée. La différence relative de réponse c.a.-c.c. de deux convertisseurs peut donc être déterminée par les changements des indications du détecteur si celui-ci est correctement étalonné.

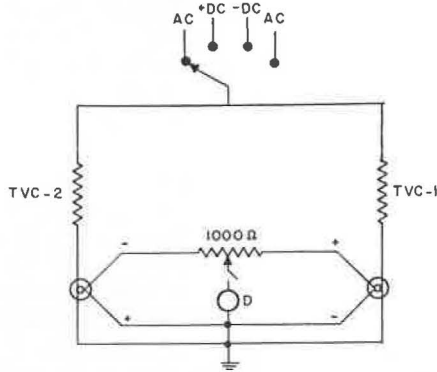


Fig. 1. — Circuit pour la comparaison des différences de réponses courant alternatif-courant continu de deux convertisseurs thermiques.

La valeur du minimum n'est pas beaucoup affectée par les changements ou les fluctuations de la tension d'alimentation. De plus, les erreurs résultant des variations de la température ambiante ou des dérives dues à l'auto-échauffement de l'un ou l'autre des convertisseurs, sont considérablement réduites en effectuant régulièrement dans le temps une série de mesures dans l'ordre c.a.-c.c. puis c.c.-c.a., pour chaque détermination.

Les différences de potentiel alternatives peuvent être mesurées avec une très haute précision au moyen du montage différentiel de la figure 2. On

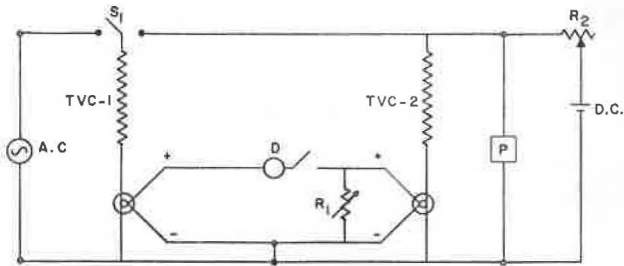


Fig. 2. — Comparateur de tension différentiel à thermocouples.

cherche d'abord à obtenir un minimum sur le détecteur pour chacune des deux positions de S_1 en agissant sur R_1 lorsque S_1 est à droite et sur R_2 lorsque S_1 est à gauche. On mesure ensuite la valeur de la tension continue à l'aide d'étalons extérieurs représentés en P. Pour réduire les erreurs dues à l'inversion du courant continu dans les thermoéléments, la tension continue est inversée et mesurée de nouveau après obtention du minimum pour les deux positions de S_1 . La tension alternative cherchée est alors

$$V_{c.a.} = V_{c.c.} (1 + \delta \times 10^{-6}),$$

où $V_{e.c.}$ est la valeur moyenne de la tension continue et δ la différence de réponse c.a.-c.c., en millionnièmes, de TVC-1.

Les mesures sur de larges domaines de courants peuvent être effectuées à l'aide d'une série de thermoéléments adéquats ou à l'aide d'un thermoélément pour courant faible et une série de shunts pour c.a. La dernière solution présente des difficultés à cause des inductances mutuelles et des effets de contact, mais paraît plus simple que l'étude et la construction d'une série de thermoéléments à faibles différences c.a.-c.c. Contre toute attente, les essais préliminaires faits au N.B.S. avec des shunts de réactance négligeable ont mis en évidence des différences c.a.-c.c. de 1 à 2×10^{-5} (et dans un cas de 5×10^{-6}). Ces différences étant indépendantes de la fréquence, elles pourraient provenir d'un effet thermoélectrique qui modifierait la résistance effective du filament de chauffage en courant continu. Cependant, un calcul approximatif montre que les erreurs dues à cette cause ne seraient pas aussi importantes. Il semble que ces erreurs puissent être produites par les revêtements d'oxyde agissant comme redresseurs de courant aux jonctions du filament de chauffage et des entrées de courant, mais cela n'a pas encore été vérifié.

Les erreurs d'origine thermoélectrique devraient être considérablement réduites dans les thermoéléments construits au N.P.L. en Grande-Bretagne, et à l'Institut de Métrologie D.I. Mendéléev en U.R.S.S. [4], [5]. Dans ces nouveaux et importants projets plusieurs thermocouples montés en série permettent de connaître la température sur toute la longueur du filament. Cela présente un certain nombre d'autres avantages, par exemple une plus grande tension de sortie. Un filament bifilaire avec un bon contact thermique entre ses deux moitiés devrait aussi réduire les erreurs d'origine thermoélectrique.

Les étalons de transfert c.a.-c.c. sont remarquablement stables dans la plus grande partie de leur gamme de fréquences. La plupart des facteurs qui pourraient modifier la réponse, tels que les variations de température et de dimensions, n'ont que peu ou pas d'influence sur la différence c.a.-c.c. On n'a pas observé de variations supérieures à 0,01 % pour la différence de réponse c.a.-c.c. du wattmètre électrodynamique du N.B.S. à 60 Hz au cours des trente dernières années, ni pour la première série de thermoéléments du N.B.S. au cours des quinze dernières années. On possède déjà la preuve qu'une stabilité à long terme de 10^{-5} peut être obtenue à l'aide de thermoéléments et de convertisseurs de tension correctement construits et étudiés. Cependant, à ce niveau de précision, il est actuellement plus sûr de se fier aux comparaisons faites de proche en proche suivant le procédé que nous avons décrit pour se mettre à l'abri de variations imprévues. La stabilité des étalons de transfert et l'importance des mesures précises des intensités et des tensions en courant alternatif rendent dignes de considération les projets de comparaisons internationales de tels étalons. Leur solidité et le fait qu'ils soient transportables rendent les convertisseurs thermiques pratiques pour de telles comparaisons entre laboratoires, mais les instruments de transfert électrodynamiques et électrostatiques ne devraient cependant être aucunement négligés.

(Avril 1965)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] HERMACH (F. L.), AC-DC transfer instruments for current and voltage measurements, *I.R.E. Trans. on Instrumentation*, I-8, 1958, p. 235.
 - [2] HERMACH (F. L.), Thermal converters as AC-DC transfer standards for current and voltage measurements, *J. of Research N.B.S.*, 48, 1952, p. 121.
 - [3] WIDDIS (F. C.), The theory of Peltier and Thomson effect in thermal AC-DC transfer devices, *Proc. I.E.E.*, 1962, Monograph 49.
 - [4] Multiple junction thermal converters, National Physical Laboratory, Teddington, England, 1964.
 - [5] Communication privée de l'Institut de Métrologie D.I. Mendéléev, Leningrad, U.R.S.S.
-

État des recherches poursuivies sur les nouveaux matériaux pour résistances

Par D. BENDER et A. KORN

Deutsches Amt für Messwesen und Warenprüfung (Allemagne)

Des recherches ont été poursuivies pour déterminer l'influence du traitement thermique et étudier la stabilité dans le temps de résistances expérimentales fabriquées avec des fils en alliage Ni-Cr (« Nikrothal L » et « Isohm »), et en alliage Fe-Cr-Al (« Kanthal DR ») caractérisés notamment par leur résistivité élevée (environ $1,33 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$) et un coefficient de température faible.

Des résistances en fil de « Nikrothal L » et de « Kanthal DR » de 0,3 mm de diamètre ont été vieillies à des températures comprises entre 120 et 600 °C. Les durées de vieillissement variaient de 1 h à plus de 100 h. Après le vieillissement on a déterminé à 20 °C la variation ΔR de la résistance et celle des deux termes (α et β) du coefficient de température. Ces trois grandeurs varient en fonction de la durée (en tendant vers une valeur limite) et de la température du recuit. Les courbes représentatives de $\Delta R/R$, α et β (*fig. 1*) résultent de mesures effectuées sur divers échantillons pour une durée de vieillissement de 10 h (de 5 h pour les températures élevées). Pour les fils de « Kanthal DR » les courbes de $\Delta R/R$ et de α sont représentées en traits discontinus au-dessus de 400 °C, l'allure de ces courbes dépendant en grande partie de la vitesse de refroidissement.

On constate d'après la figure 1 que les variations des trois grandeurs considérées augmentent considérablement lorsque la température de recuit dépasse 120 °C pour le « Kanthal DR » et 170 °C pour le « Nikrothal L ». Les variations atteignent leur maximum vers 200 °C pour le « Kanthal DR » et vers 400 °C pour le « Nikrothal L ». On remarque que, contrairement à ce qui a lieu pour la manganine, la valeur de β , c'est-à-dire de la courbure de la courbe température-résistance varie également avec la température de vieillissement. Il est probable que l'allure de la courbe soit, dans une large

mesure, déterminée par l'apparition de l'état K, phénomène étudié pour la première fois par H. Thomas [1]. Pour le « Kanthal DR », les courbes de $\Delta R/R$ et de α s'accordent qualitativement avec les résultats obtenus par A. Schulze sur des fils de résistances de chauffage en Fe-Cr-Al [2].

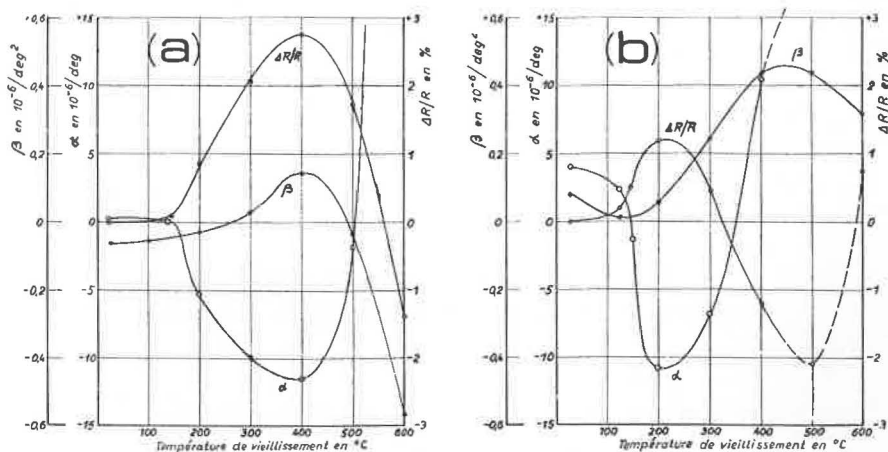


Fig. 1. — Variation, en fonction de la température de vieillissement, du rapport $\Delta R/R$ et des termes α et β du coefficient de température pour des résistances en fil de « Nikrothal L » (a) et de « Kanthal DR » (b) de 0,3 mm de diamètre.

Les variations de la résistance lors du vieillissement sont beaucoup moins importantes pour les fils fins, de diamètre inférieur à 0,1 mm, le plus souvent utilisés en pratique, que pour les gros fils. Elles dépendent en grande partie du traitement primaire subi à la fabrication et peuvent être réduites à environ 1/100 des valeurs données sur la figure 1. D'importantes différences dans le comportement des résistances sont aussi provoquées par les déformations.

Lors de la fabrication des résistances de précision à coefficients de température aussi faibles que possible, il faut prendre en considération la variation de ces coefficients consécutive au vieillissement. Pour une durée de vieillissement de 100 h à des températures comprises entre 120 et 140 °C, α peut varier d'environ $-5 \times 10^{-6}/\text{deg}$. Lors de la fabrication de résistances de 10 k Ω à 1 M Ω en fil « Isohm » isolé au vernis, de 0,1 à 0,02 mm de diamètre, α a même varié de $-9 \times 10^{-6}/\text{deg}$ par rapport à la valeur de départ déterminée pour la charge correspondante. Cependant, dans ce cas, la traction subie par le fil au moment du bobinage n'est certainement pas étrangère à cette variation.

Après une période d'observation d'environ quatre ans, les variations de la résistance électrique en fonction du temps atteignent au maximum $\pm 50 \times 10^{-6}$ pour le « Kanthal DR » et $\pm 40 \times 10^{-6}$ pour le « Nikrothal L ». Les résistances expérimentales en fil d'« Isohm » de 0,05 à 1,2 mm de diamètre, soumises à un vieillissement de 150 h entre 120 et 160 °C, présentent après le même temps d'observation (4 ans) une variation maximale de $\pm 50 \times 10^{-6}$.

Les résultats des mesures poursuivies sur ces trois alliages montrent par

exemple des variations de résistance atteignant au maximum $\pm 40 \times 10^{-6}$ et, dans la plupart des cas, ± 5 à $\pm 10 \times 10^{-6}$ seulement.

Les résultats obtenus au cours de ces recherches indiquent que les alliages « Kanthal DR », « Nikrothal L » et « Isohm » conviennent pour la fabrication de résistances de précision susceptibles d'être étalonnées. Actuellement, le programme de fabrication s'étend à des résistances étalons de 10 k Ω , 100 k Ω et 1 M Ω en « Isohm » avec enroulement dans un boîtier hermétique [3], dont les coefficients de température peuvent être nuls et atteindre jusqu'à $-4 \times 10^{-6}/\text{deg}$. Le comportement de ces résistances en fonction du temps fera l'objet d'un rapport ultérieur.

(Avril 1965)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] THOMAS (H.), *Z. f. Metallkunde*, **41**, 1950, p. 185.
 - [2] SCHULZE (A.), *Z. f. Metallkunde*, **42**, 1951, p. 120.
 - [3] SCHULZE (A.) et ZACHERL (H.), *Z. f. angew. Physik*, **6**, 1954, p. 324.
-

Détermination du coefficient gyromagnétique du proton

Par K. HARA, N. KOIZUMI, H. NAKAMURA et H. IMAIZUMI

Electrotechnical Laboratory (Japon)

Le coefficient gyromagnétique du proton (γ_p) a été déterminé dans une sphère d'eau en mesurant sa précession libre dans le champ magnétique connu créé par un système de bobines dont les spires étaient parcourues par un courant électrique connu. On a pris soin d'éviter les perturbations dues au champ magnétique terrestre et au champ additionnel produit par l'activité humaine. On a examiné l'influence de la non-uniformité du champ résultant de la faible longueur des bobines d'induction sur l'affaiblissement du signal de précession; cette influence ne produisait aucune erreur systématique dans la détermination de la période de précession.

On a estimé avec une bonne approximation la correction de susceptibilité due à la substance placée dans le champ des bobines. La détermination de la période, le réglage du courant d'alimentation, de la température et des autres paramètres ont fait l'objet d'un programme et ont été enregistrés automatiquement; on effectuait une détermination de la période toutes les 15 secondes. On obtenait ainsi dans un court intervalle de temps un nombre suffisant de résultats pour éliminer les fluctuations des champs terrestre et autres.

Le résultat, exprimé en fonction de l'ampère conservé à l'E.T.L. et sans correction diamagnétique, est le suivant:

$$\gamma_p = 2,675\ 163 (1 \pm 10 \times 10^{-6}) \times 10^8 \text{ Wb}^{-1}\text{m}^2\text{s}^{-1}.$$

Cette valeur devient

$$\gamma_p = 2,675\ 171 \times 10^8 \text{ Wb}^{-1}\text{m}^2\text{s}^{-1}$$

si on l'exprime en fonction de l'unité d'intensité de courant définie par les étalons de l'ohm et du volt conservés au Bureau International.

(Mai 1965)

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ 11^e Session (1965)

	Pages
	E
Avertissement historique	5
Liste des membres	7
Ordre du jour	10
 Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par P. Vigoureux.	
Comparaisons des étalons nationaux de résistance et de force électromotrice. (Résultats. Offre de l'I.M.M. de déposer au B.I.P.M. un étalon de résistance. Intérêt de constituer au B.I.P.M. une réserve de piles étalons).....	11
Déterminations absolues. Valeurs, en unités absolues, des étalons en dépôt au B.I.P.M.	12
Amélioration de la stabilité des éléments Weston (Le L.C.I.E. est chargé de présenter à la prochaine session une synthèse des travaux effectués par les laboratoires)	13
Comparaison internationale des étalons de capacité au mica de 0,1 μ F (Résul- tats de la première partie de cette comparaison).....	13
Proposition de comparaison internationale d'étalons de capacité de faibles valeurs (Travaux en cours dans les laboratoires nationaux; rôle du B.I.P.M. dans ces comparaisons).....	13
Examen des possibilités de comparaison internationale d'étalons d'inductance (Travaux de l'I.E.N. L'organisation d'une telle comparaison par le B.I.P.M. n'est pas actuellement retenue).....	14
Utilisation de diodes de Zener comme étalons de tension transportables (Tra- vaux des laboratoires nationaux. L'échange de diodes est actuellement limité entre laboratoires; la fixation d'une valeur normalisée pour la tension des diodes est considérée comme prématurée)	14
Étalons de transfert pour le passage du courant continu au courant alternatif (Travaux du N.B.S.)	15
Examen du rapport du Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofré- quences (Approbation du programme de comparaisons internationales proposé).....	15
<i>Recommandation E 1</i> demandant la participation du B.I.P.M. à la coordi- nation et au développement de la métrologie des grandeurs aux radiofré- quences	16

Questions diverses (Manque d'uniformité dans la notation des fréquences. Détermination de γ_p à l'E.T.L.)	16
Rapport du Groupe de travail pour la mesure des grandeurs électriques dans le domaine des hautes fréquences, des ultra-hautes fréquences et des hyper- fréquences (Établissement du programme des comparaisons internationales proposées; liaison avec la Commission N° 1 de l'U.R.S.I.; modification du nom de ce Groupe de travail: « Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences »)	16

Annexes

1. B.I.P.M. — <i>Rapport sur la 10^e comparaison des étalons nationaux de résis- tance électrique (décembre 1963 — mars 1964)</i> , par G. Leclerc	19
2. B.I.P.M. — <i>Rapport sur la 10^e comparaison des étalons nationaux de force électromotrice (janvier — février 1964)</i> , par G. Leclerc	28
3. E.T.L. (Japon). — <i>Détermination absolue de Ω_{ETL}</i>	35
4. N.S.L. (Australie). — <i>Détermination absolue de l'ohm fondée sur un condensateur calculable</i> , par A. M. Thompson	39
5. N.P.L. (Royaume-Uni). — <i>Détermination absolue de Ω_{NPL} par la méthode de Campbell</i> , par G. H. Rayner	41
6. N.S.L. (Australie). — <i>Un électromètre absolu pour la détermination du volt</i> , par W. K. Clothier	44
7. I.M.M. (U.R.S.S.). — <i>Résultats de l'ensemble des mesures effectuées à l'I.M.M. sur les étalons de capacité voyageurs au mica de 0,1 μF</i> , par I. Krotkov et T. Goutchina	46
8. B.I.P.M. — <i>Résultats de la première partie de la comparaison circulaire des étalons de capacité voyageurs au mica de 0,1 μF</i> , par G. Leclerc	52
9. I.M.M. (U.R.S.S.). — <i>Méthode précise pour déterminer une capacité à partir des unités de résistance et de fréquence</i> , par I. Krotkov	57
10. N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — <i>Un condensateur transportable amé- lioré de 10 pF</i> , par R. D. Cutkosky et L. H. Lee	65
11. I.E.N. (Italie). — <i>Autodétermination des inductances parasites du pont à diviseur inductif utilisé pour la comparaison d'étalons d'inductance</i> , par E. Arri et E. Chiusano	67
12. I.E.N. (Italie). — <i>A propos de l'équilibrage du pont de Maxwell dans la comparaison entre étalons d'inductance et de capacité</i> , par C. Chiodi ..	71
13. N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — <i>Sur la stabilité à long terme des diodes de Zener étalons</i> , par W. G. Eicke Jr. et H. H. Ellis	73
14. D.A.M.W. (Allemagne). — <i>Rapport sur l'utilisation des diodes de Zener comme étalons de tension</i> , par W. Schlesok	78
15. Bureau Fédéral des Poids et Mesures (Suisse). — <i>Étalon de tension transportable à diode de Zener; essai de réalisation</i> , par P. Jeanguenin et P. Koch	81
16. N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — <i>Convertisseurs thermiques utilisés comme étalons de transfert courant alternatif — courant continu pour la mesure des intensités et des tensions en courant alternatif</i> , par F. L. Hermach	83
17. D.A.M.W. (Allemagne). — <i>État des recherches poursuivies sur les nou- veaux matériaux pour résistances</i> , par D. Bender et A. Korn	89
18. E.T.L. (Japon). — <i>Détermination du coefficient gyromagnétique du proton</i> , par K. Hara, N. Koisumi, H. Nakamura et H. Imaizumi	92



IMPRIMERIE DURAND

28-LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1967, n° 496
Dépôt légal, Éditeur, 1967, n° 1507

ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 15-3-1967

Imprimé en France