

COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ

SESSION DE 1972



COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

COMITÉ CONSULTATIF
D'ÉLECTRICITÉ

13^e SESSION — 1972
(12-13 octobre)



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Pavillon de Breteuil, F 92310 SÈVRES, France

Dépositaire : OFFILIB, 48 rue Gay-Lussac, F 75005 Paris



NOTICE HISTORIQUE

Les organes de la Convention du Mètre

Le Bureau International, le Comité International et la Conférence Générale des Poids et Mesures

Le *Bureau International des Poids et Mesures* (B.I.P.M.) 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 (45 520 m²) 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 du *Comité International des Poids et Mesures* (C.I.P.M.), placé lui-même sous l'autorité de la *Conférence Générale des Poids et Mesures* (C.G.P.M.).

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 International d'Unités (SI), forme moderne 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 rayonnements ionisants (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 rayonnements ionisants.

Une trentaine de physiciens ou techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau International; ils font des recherches métrologiques ainsi que des mesures dont les résultats sont consignés dans des certificats portant sur des étalons des grandeurs ci-dessus. Le budget annuel du Bureau International est de l'ordre de 3 000 000 de francs-or, soit environ 1 000 000 de dollars U.S.

(1) Au 31 décembre 1972, quarante et un États sont membres de cette Convention: Afrique du Sud, Allemagne, Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, 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, Venezuela, 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, qui peuvent créer des « Groupes de travail » temporaires ou permanents pour l'étude de sujets particuliers, 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 de chacun des grands Laboratoires de métrologie et des Instituts spécialisés dont la liste est établie par le Comité International, de membres individuels désignés également par le Comité International et d'un représentant du Bureau International. Ces Comités tiennent leurs sessions à des intervalles irréguliers; ils sont actuellement au nombre de sept :

1. Le *Comité Consultatif d'Électricité* (C.C.E.), créé en 1927.
2. Le *Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie* (C.C.P.R.), nouveau nom donné en 1971 au *Comité Consultatif de Photométrie* (C.C.P.) créé en 1933 (de 1930 à 1933 le Comité précédent (C.C.E.) s'est occupé des questions de photométrie).
3. Le *Comité Consultatif de Thermométrie* (C.C.T.), créé en 1937.
4. Le *Comité Consultatif pour la Définition du Mètre* (C.C.D.M.), créé en 1952.
5. Le *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde* (C.C.D.S.), créé en 1956.
6. Le *Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants* (C.C.E.M.R.I.), créé en 1958. Depuis 1969 ce Comité Consultatif est constitué de quatre sections : Section I (Rayons X et γ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie α).
7. Le *Comité Consultatif des Unités* (C.C.U.), 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* ;
- *Recueil de Travaux du Bureau International des Poids et Mesures* (ce Recueil rassemble les articles publiés dans des revues et ouvrages scientifiques et techniques, ainsi que certains travaux publiés sous forme de rapports multilingués).

Le Bureau International publie de temps en temps, sous le titre *Les récents progrès du Système Métrique*, un rapport sur les développements du Système Métrique (SI) dans le monde.

La collection des *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (22 tomes publiés de 1881 à 1966) a été arrêtée en 1966 par décision du Comité International.

Depuis 1965 la revue internationale *Metrologia*, éditée 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 organes de la Convention du Mètre.

Comité International des Poids et Mesures

<i>Secrétaire</i>	<i>Vice-Président</i>	<i>Président</i>
J. DE BOER	J. V. DUNWORTH	J. M. OTERO

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ

Président

F. J. LEHANY, Membre du Comité International des Poids et Mesures; Chef de la Division of Applied Physics, National Standards Laboratory, *Chippendale* (Australie).

Membres

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES [N.R.C.], *Ottawa*.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS : LABORATOIRE CENTRAL DES INDUSTRIES ÉLECTRIQUES [L.C.I.E.], *Fontenay-aux-Roses* (France).

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

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

ISTITUTO ELETTROTECNICO NAZIONALE GALILEO FERRARIS [I.E.N.], *Turin*.

INSTITUT DE MÉTROLOGIE D. I. MENDÉLÉEV [I.M.M.], *Leningrad*.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [N.B.S.], *Washington*.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [N.P.L.], *Teddington* (Grande-Bretagne).

NATIONAL PHYSICAL RESEARCH LABORATORY [N.P.R.L.], *Pretoria*.

NATIONAL STANDARDS LABORATORY [N.S.L.], *Chippendale* (Australie).

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [P.T.B.], *Braunschweig*.

Le Directeur du Bureau International des Poids et Mesures [B.I.P.M.], *Sèvres*.

* Maintenant « Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung » [A.S.M.W.].

ORDRE DU JOUR DE LA SESSION

1. Résultats des 12^e comparaisons des étalons nationaux de résistance et de force électromotrice. Organisation des prochaines comparaisons.
 2. Enceintes thermorégulées pour le « transfert du volt ».
 3. Comparaison internationale d'étalons de résistance de $10^4 \Omega$.
 4. Comparaison circulaire d'étalons de capacité de 10 pF.
 5. Déterminations absolues.
 6. Contrôle de la permanence des étalons de référence de f.é.m.
 7. Valeur de e/h .
 8. Comparaison internationale d'instruments de passage courant continu — courant alternatif.
 9. Rapport du Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences.
 10. Questions diverses.
-

13^e SESSION (1972)

RAPPORT

AU

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Par A. F. DUNN, Rapporteur

Le Comité Consultatif d'Électricité (C.C.E.) s'est réuni pour sa treizième session au Bureau International des Poids et Mesures, à Sèvres, où il a tenu trois séances les jeudi 12 et vendredi 13 octobre 1972.

Étaient présents :

F. J. LEHANY, Membre du C.I.P.M., président du C.C.E.

Les délégués des laboratoires membres :

Conseil National de Recherches [N.R.C.], Ottawa (A. F. DUNN, Chef de la Section Électricité).

Conservatoire National des Arts et Métiers : Laboratoire Central des Industries Électriques [L.C.I.E.], Fontenay-aux-Roses (Ph. OLMER, Directeur général; J. BLOUET, Responsable du Département Métrologie; N. ELNÉKAVÉ, Chef de Service).

Electrotechnical Laboratory [E.T.L.], Tokyo (R. ISHIGE, Chief, Radio Electronics Section).

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris [I.E.N.], Turin (C. EGIDI, Conseiller en métrologie; E. ARRI, Chef du Département Métrologie électrique).

National Bureau of Standards [N.B.S.], Washington (C. H. PAGE, Chief, Electricity Division; H. M. ALTSCHULER, Senior Research Scientist, Electromagnetics Division).

National Physical Laboratory [N.P.L.], Teddington (A. E. BAILEY, Superintendent, Division of Electrical Science; G. H. RAYNER, Principal Scientific Officer).

National Physical Research Laboratory [N.P.R.L.], Pretoria
(R. TURNER, Head, Precise Physical Measurement Division).
National Standards Laboratory [N.S.L.], Chippendale (D. L.
HOLLWAY, Leader, Radiofrequency and Microwave Section).
Physikalisch-Technische Bundesanstalt [P.T.B.], Braunschweig
(H. J. SCHRADER, Vizepräsident; W. CLAUSNITZER, Leitender
Direktor).

Le Directeur du B.I.P.M. (J. TERRIEN).

Assistaient aussi à la session : P. GIACOMO, sous-directeur du B.I.P.M. ;
G. LECLERC et T. WITT (B.I.P.M.).

Absents : Deutsches Amt für Messwesen und Warenprüfung
[D.A.M.W.], Berlin; Institut de Métrologie D.I. Mendéléév
[I.M.M.], Leningrad.

Le Président et le Directeur du B.I.P.M. souhaitent la bienvenue aux participants, puis l'ordre du jour qui avait été envoyé aux membres le 8 juin 1972 est adopté.

Mr Dunn est nommé rapporteur, assisté de Mr Leclerc comme secrétaire.

1. Résultats des 12^e comparaisons (1970) des étalons nationaux de résistance et de force électromotrice. Organisation des prochaines comparaisons

Mr Leclerc n'a aucun commentaire à ajouter au rapport sur la comparaison des étalons nationaux de résistance (Document 72-1) ⁽¹⁾.

En ce qui concerne les réalisations de l'unité de force électromotrice (Document 72-2), il indique que des comparaisons bilatérales ultérieures entre le N.B.S. et quatre laboratoires, dont le B.I.P.M., en utilisant des enceintes thermorégulées transportables ont fait apparaître des incohérences : certaines de ces comparaisons confirment les résultats de la comparaison internationale, d'autres sont en désaccord de 0,5 à 0,6 μ V. Ces divergences sont décevantes, car la sensibilité supposée de ces comparaisons bilatérales était 0,1 μ V, et elles demeurent inexplicables. En conséquence, Mr Leclerc souhaite que les laboratoires participants engagent dans la prochaine comparaison internationale, comme aux comparaisons antérieures, un groupe de piles nues qui seront comparées dans le bain d'huile à 20 °C du B.I.P.M., avec en plus, s'ils en ont la possibilité, un groupe de piles conservées dans une enceinte thermorégulée.

Mr Leclerc propose également aux laboratoires d'envoyer au B.I.P.M.

⁽¹⁾ La liste des Documents de travail présentés à cette session est publiée à l'Annexe E 1.

des thermomètres (à résistance ou à mercure) pour pouvoir contrôler la concordance entre les échelles de température utilisées par chaque laboratoire.

2. Enceintes thermorégulées pour le « transfert du volt »

Mr *Page* commente le Document 72-25 relatif au programme mis en œuvre aux États-Unis pour « transférer le volt » du N.B.S. aux autres laboratoires américains. Ce programme, fondé sur l'emploi de piles conservées dans des enceintes thermorégulées transportables, permet de contrôler les valeurs locales avec une précision d'environ 1×10^{-7} .

Mr *Page* fait aussi remarquer que si les comparaisons s'effectuaient assez rapidement, l'utilisation de piles non saturées permettrait de réduire l'influence possible des variations de la température ambiante; d'ailleurs, au N.B.S., on emploie conjointement des piles saturées et des piles non saturées pour contrôler le comportement du groupe primaire de référence au moyen de l'effet Josephson.

Mr *Schrader* dit qu'à la P.T.B. on envisage aussi l'utilisation de piles non saturées lors de la mise en œuvre de l'effet Josephson.

3. Comparaison internationale d'étalons de résistance de $10^4 \Omega$.

Date des prochaines comparaisons triennales

Plusieurs laboratoires souhaitent qu'une comparaison internationale d'étalons de résistance de $10^4 \Omega$ soit effectuée par le B.I.P.M. Ces étalons jouent en effet un rôle essentiel dans la détermination absolue de l'ohm et sont maintenant de très bonne qualité.

Le B.I.P.M. est d'accord pour effectuer cette comparaison à la même époque que la comparaison triennale des étalons de 1Ω . Le C.C.E. décide que la comparaison sera faite à 20°C . La P.T.B., le N.B.S., le N.S.L., le N.R.C., l'I.E.N. et le N.P.L. enverront des étalons pour participer à cette comparaison.

Les prochaines comparaisons triennales des étalons nationaux de résistance et de force électromotrice auront lieu à partir du 3 janvier 1973 et dureront jusqu'au 15 avril environ. Les participants sont invités à faire parvenir leurs étalons voyageurs au B.I.P.M. avant le 10 décembre 1972 en ce qui concerne les piles nues et les résistances, et avant le 20 janvier 1973 en ce qui concerne les piles conservées dans des enceintes thermorégulées.

4. Comparaison circulaire d'étalons de capacité de 10 pF

Le troisième et le quatrième cycles de comparaisons sont terminés; le cinquième le sera prochainement. Les résultats obtenus (Document 72-17) prouvent que la mise au point d'un condensateur calculable du type Thompson-Lampard est une entreprise difficile et de longue

haleine qui n'est pas encore terminée dans tous les laboratoires. Ils montrent par ailleurs que les condensateurs voyageurs construits au N.B.S. sont d'une stabilité égale, sinon supérieure, à celle des meilleurs étalons de résistance de 1Ω et qu'ils permettent de comparer les étalons représentatifs de l'unité de capacité à 1×10^{-7} près.

Le B.I.P.M. ayant proposé que la comparaison soit prolongée, plusieurs laboratoires (P.T.B., N.S.L., N.R.C., I.E.N., E.T.L., N.P.L.) annoncent leur intention de participer à de nouveaux cycles de comparaisons.

5. Déterminations absolues

Le C.C.E. a pris connaissance des travaux en cours sur la détermination des unités électriques absolues, en particulier en ce qui concerne le volt (N.B.S., E.T.L., N.S.L.), le condensateur calculable (N.B.S., L.C.I.E., N.P.L.), le coefficient gyromagnétique du proton (E.T.L., N.P.L.) (Documents 72-7, 10, 8, 22, 18, 15, 5).

6.7. Contrôle de la permanence des étalons de référence de f.é.m.

Valeur de $2e/h$

L'effet Josephson est déjà utilisé pour maintenir constante la réalisation du volt conservée dans plusieurs laboratoires. La P.T.B., le N.B.S., le N.S.L., l'E.T.L. et le L.C.I.E. décrivent leurs installations et les procédés de contrôle qu'ils emploient (Documents 72-4, 6, 3, 14 et 21).

Au cours de la discussion qui s'engage ensuite, Mr *Schrader* insiste sur le fait qu'il n'appartient pas au C.C.E. de recommander une valeur pour la constante physique fondamentale e/h .

Le C.C.E. juge par ailleurs peu souhaitable de donner un nom spécial à une unité de force électromotrice qui serait réalisée à partir de l'effet Josephson. Il considère cependant qu'en extrapolant au 1^{er} janvier 1969 les résultats obtenus depuis cette date par différents laboratoires, on peut donner dès maintenant une estimation de la relation entre V_{69-BI} (à la date du 1^{er} janvier 1969) (Document 72-24) et la fréquence utilisée dans la mise en œuvre de l'effet Josephson, et il adopte la déclaration E-72 (p. E 13).

8. Comparaison internationale d'instruments de passage courant continu — courant alternatif

Mr *Page* signale qu'une comparaison d'instruments de transfert courant continu — courant alternatif est en cours entre le N.B.S., l'I.M.M., l'E.T.L. et le N.P.L. Les instruments sont actuellement à l'I.M.M. (Document 72-11).

La participation d'autres laboratoires serait bienvenue. Les laboratoires intéressés pourront prendre contact avec Mr *Page*.

9. Rapport du Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences

Mr *Bailey* présente le rapport de ce Groupe de travail qui s'est réuni les 10 et 11 octobre 1972 sous la présidence de Mr *Lehany* (p. E 14).

Le C.C.E. approuve les Recommandations et le programme de comparaisons présentés par ce Groupe et le remercie pour le travail qu'il a effectué.

10. Questions diverses

Diffusion des résultats des comparaisons internationales. — Mr *Turner* demande comment les laboratoires qui ne participent pas aux comparaisons internationales circulaires doivent procéder pour profiter des résultats de ces comparaisons. Il est convenu que ces laboratoires doivent se mettre en rapport avec le laboratoire pilote.

Périodicité des comparaisons des étalons nationaux. — En réponse à une question de Mr *Rayner*, le C.C.E. confirme la périodicité triennale des comparaisons des étalons nationaux de résistance et de force électromotrice. Il décide que les comparaisons auront toujours lieu durant le premier trimestre de l'année et que les étalons voyageurs devraient parvenir au B.I.P.M. au début du mois de décembre précédant ce trimestre.

* * *

Au nom de ses collègues, Mr *Page* remercie le Président pour la façon aimable et efficace avec laquelle il a dirigé les travaux de la 13^e session du C.C.E.

Le *Président* remercie à son tour les membres du C.C.E. de leur fructueuse collaboration.

(Octobre 1972)

Déclaration E-72 du C.C.E. (*)

Le Comité Consultatif d'Électricité,

CONSIDÉRANT

— que l'effet Josephson permet de reproduire des échelons de potentiel électrique avec une haute précision,

— que plusieurs laboratoires utilisent ce procédé pour maintenir constante leur réalisation du volt,

(*) Cette Déclaration a été approuvée par le C.I.P.M. à sa 61^e session (octobre 1972).

— que l'on dispose ainsi de résultats permettant de rattacher la valeur des échelons de potentiel d'effet Josephson aux réalisations du volt conservées dans plusieurs laboratoires,

ESTIME d'après ces résultats qu'au 1^{er} janvier 1969 V_{69-71} était égal, à un demi-millionième près, à l'échelon de potentiel qui serait produit par l'effet Josephson dans une jonction irradiée à la fréquence de 483 594,0 GHz.

Appendice

Rapport du Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences

Le Groupe de travail s'est réuni au Pavillon de Breteuil à Sèvres, les 10 et 11 octobre 1972.

Étaient présents : MM. F. J. Lehany, Président ; G. Almassy (I.R.T., Budapest), H. M. Altschuler (N.B.S.), A. E. Bailey (N.P.L.), H. Bayer (P.T.B.), J. Blouet (L.C.I.E.), C. R. Ditchfield (R.R.E., Malvern), C. Egidi (I.E.N.), D. L. Hollway (N.S.L.), R. Ishige (E.T.L.), P. O. Lundbom (R.I.N.D., Stockholm, représentant également l'U.R.S.I.), F. Pattenson (N.R.C.).

Assistaient aussi à la réunion : MM. J. Terrien, directeur du B.I.P.M., P. Giacomo, G. Leclerc et T. Witt (B.I.P.M.).

Absents : les représentants du D.A.M.W. (Berlin) et de l'I.M.M. (Leningrad).

L'ordre du jour provisoire, qui avait été adressé aux membres le 8 juin 1972, est accepté en y ajoutant le point I.8 : Méthodes à adopter pour les futures comparaisons internationales.

I. État d'avancement et résultats déjà connus des comparaisons internationales

I.1. *Instruments de mesure des faibles puissances à la fréquence de 3 GHz* (Laboratoire pilote : N.B.S.). — Cette comparaison, qui a débuté en 1965, a été effectivement achevée en 1968. Le rapport définitif est donné dans le Document GT-RF/72-7B ⁽¹⁾ et les conclusions ont été publiées dans *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **19**, N° 4, Avril 1971).

I.2. *Paramètres diélectriques à la fréquence de 10 GHz* (Laboratoire pilote : N.B.S.; participants : N.B.S., N.R.C., I.M.P.R., [le N.P.L. s'est retiré]). — Les mesures sont achevées et un projet de rapport a été présenté (Document GT-RF/72-7C). Malgré des demandes réitérées, on n'a reçu aucun commentaire de l'I.M.P.R. sur ce projet de rapport. Le Groupe de travail décide que le laboratoire pilote doit achever la préparation du rapport définitif à partir du projet actuel.

I.3. *Instruments de mesure des faibles puissances à la fréquence de 10 GHz* (trois comparaisons).

a) Laboratoire pilote : E.T.L.; participants : E.T.L., N.B.S., I.R.T., D.A.M.W., I.M.P.R., auxquels sont venus s'ajouter ultérieurement le N.R.C. et l'I.E.N.

Le rapport définitif sur cette comparaison (Document GT-RF/72-5) a été présenté au Groupe de travail. La comparaison a été du type circulaire. Les mesures ont commencé en juin 1966 et se sont achevées en décembre 1971. Sur les dix étalons voyageurs engagés à l'origine, trois seulement ont achevé sans accident (perte ou dommages) le circuit complet des mesures.

b) Laboratoire pilote : I.M.P.R.; participants : I.M.P.R., E.T.L., N.R.C., N.S.L., I.E.N., L.C.I.E., P.T.B.

On n'a reçu aucun rapport de l'I.M.P.R. (Moscou) sur cette comparaison et aucun représentant de ce laboratoire n'est présent pour donner un rapport verbal en cours de réunion. Le L.C.I.E. signale avoir reçu et mesuré les étalons voyageurs de l'I.M.P.R.

⁽¹⁾ La liste des Documents de travail présentés à cette réunion est publiée à l'Annexe E 1.

et de l'E.T.L. En l'absence de plus ample information le Groupe de travail ne peut étudier davantage cette comparaison.

c) Comparaisons parallèles restreintes.

1) Dans le Document GT-RF/72-10, le L.C.I.E. rend compte d'une comparaison de mesures de puissance à la fréquence de 10 GHz, qui a été faite entre le L.C.I.E., la P.T.B., le N.R.C. et l'O.M.H. (Hongrie). Il s'agit d'un rapport provisoire, car un certain nombre de corrections doivent encore être apportées aux résultats de l'O.M.H.

2) Dans le Document GT-RF/72-9, le R.R.E. rend compte d'une comparaison de mesures de puissance à la fréquence de 9 GHz, qui a été faite entre le R.R.E., le N.B.S. et le R.I.N.D.

Le N.B.S. précise que de la série des comparaisons internationales de puissance effectuées sur une période d'environ dix ans, il tire une conclusion importante: au cours de cette période l'accord entre les mesures faites dans différents pays s'est amélioré d'un facteur 10 environ.

I.4. *Tension à la fréquence de 1 GHz* (Laboratoire pilote: N.B.S.; participants: N.B.S., N.R.C., O.M.H., N.P.L., auxquels est venu s'ajouter l'E.Q.D. (Grande-Bretagne)). — Un rapport provisoire sur cette comparaison a été présenté (Document GT-RF/72-7D). Tous les laboratoires ont achevé leurs mesures et fourni leur rapport, sauf l'E.Q.D. qui devrait donner ses résultats très prochainement. Cette comparaison a été du type « en étoile » plutôt que du type circulaire.

I.5. *Affaiblissement à la fréquence de 30 MHz* (Laboratoire pilote: N.S.L.; participants: N.S.L., E.T.L., N.B.S., N.R.C., N.P.L., O.M.H.). — Un rapport verbal a été donné sur cette comparaison qui a été achevée depuis l'envoi du Document provisoire GT-RF/72-2. Les dernières mesures ont fait soupçonner un défaut de stabilité des étalons voyageurs; les mesures effectuées au laboratoire pilote après retour des étalons ont confirmé ce défaut et montré qu'il était de nature à jeter le doute sur les résultats. Bien que les premiers résultats aient montré un bon accord entre les laboratoires intéressés, la seule conclusion possible était l'annulation de la totalité de la comparaison; le défaut de stabilité provenait d'un affaiblisseur tampon utilisé dans toutes les mesures; les affaiblisseurs à comparer étaient apparemment indemnes.

I.6. *Affaiblissement à la fréquence de 10 GHz, sur guide d'ondes* (Laboratoire pilote: R.I.N.D.; participants: R.I.N.D., P.T.B., O.M.H., I.E.N., L.C.I.E., N.P.L., N.R.C., N.S.L., E.T.L.). — Un rapport officiel sur cette comparaison a été présenté; il donne les résultats obtenus jusqu'ici (Document GT-RF/72-8). La comparaison est presque achevée après deux ans de mesures. Chacun des neuf laboratoires participants a fourni des étalons voyageurs; deux ont été cassés.

I.7. *Affaiblissement jusqu'à la fréquence de 8 GHz, en coaxial* (Laboratoire pilote: N.P.L.; participants: N.P.L., N.B.S., N.R.C., R.I.N.D.). — Cette comparaison s'est achevée juste avant la réunion du Groupe de travail et un rapport provisoire a été présenté (Document GT-RF/72-6). Avec quatorze étalons voyageurs qui ont été mesurés à quatre fréquences dans quatre laboratoires, cette comparaison a nécessité deux de mille mesures. L'un des étalons voyageurs s'est révélé instable et les autres étaient en mauvais état à la fin de la comparaison circulaire.

I.8. *Méthodes à adopter pour les futures comparaisons internationales.* — Le paragraphe 2 du Document GT-RF/72-3, soumis par l'I.M.M., a constitué le point de départ de la discussion du Groupe de travail sur ce problème.

Le Groupe de travail pense que les comparaisons internationales récemment achevées ont été très utiles; elles ont en effet permis de faire progresser les techniques de mesures aux radiofréquences; elles ont fourni aux laboratoires des renseignements qui leur ont permis d'élaborer leurs programmes de recherches futures; elles ont enfin permis aux laboratoires nationaux de contrôler le fonctionnement de leurs étalons de référence. Le Groupe de travail adopte à ce sujet la *Recommandation* GT-RF 1.

Lors de sa précédente réunion (1968) le Groupe de travail avait recommandé que tous les résultats des comparaisons soient immédiatement communiqués à tous les laboratoires participants. L'expérience a montré depuis que cette façon de procéder présente des inconvénients. Le Groupe de travail adopte en conséquence la *Recommandation* GT-RF 2 qui modifie sa recommandation antérieure.

L'expérience de plusieurs comparaisons internationales récentes a montré qu'il est extrêmement important de fournir des étalons voyageurs suffisamment robustes pour résister aux rigueurs d'une longue série de mesures et de les éprouver complètement avant le début de la comparaison. Il est également très souhaitable que le fonctionnement des étalons soit contrôlé à intervalles fréquents par le laboratoire pilote. Ces considérations ont conduit le Groupe de travail à la conclusion que, tout en laissant toute latitude au laboratoire pilote d'organiser la comparaison de la façon qu'il juge la meilleure, il vaudrait généralement mieux que la circulation des étalons s'effectue suivant un schéma « en étoile » (retour des étalons au laboratoire pilote après leur mesure dans chaque laboratoire) ou un schéma « en pétales » (retour des étalons après passage dans deux laboratoires), plutôt que suivant un schéma circulaire, généralement utilisé jusqu'ici.

Le Groupe de travail est d'accord pour que les laboratoires de pays qui ne sont pas représentés au Groupe de travail ou de pays qui n'adhèrent pas à la Convention du Mètre, soient encouragés à prendre part aux comparaisons futures. Le représentant de l'U.R.S.I. préparera un rapport pour publication dans le Bulletin de l'U.R.S.I. en mettant l'accent sur ce point. Des lettres personnelles aux laboratoires dont on connaît l'intérêt pour ces travaux peuvent aussi être très utiles.

Certains membres du Groupe de travail expriment leur inquiétude au sujet des retards et des absences de communication qui se sont produits au cours des récentes comparaisons internationales. C'est un problème auquel les laboratoires pilotes doivent porter une attention particulière pour les comparaisons futures : ils devraient, dès le début d'un programme, proposer aux participants un calendrier pour les mesures et faire en sorte que tout changement éventuel fasse rapidement l'objet d'un accord et soit porté à la connaissance des participants.

II. *Choix des fréquences auxquelles il est souhaitable d'effectuer les mesures et les comparaisons internationales dans le domaine des radiofréquences*

Afin d'éviter un travail trop important pour conserver les étalons à toutes les fréquences possibles, on préfère en Grande-Bretagne restreindre les étalonnages à un certain nombre de fréquences choisies selon les indications données dans le Document GT-RF/72-1. Toutes choses étant égales par ailleurs on a l'impression que cela pourrait également s'appliquer aux comparaisons internationales. Le Groupe de travail a pris note de ce document et en a tenu compte dans le programme des futures comparaisons.

III. *Comparaisons à prévoir. Travaux futurs*

Le Groupe de travail établit un programme des comparaisons à entreprendre dans un proche avenir, en tenant compte des points énumérés dans la Recommandation GT-RF 4 de 1968, des propositions soumises par l'I.M.M. (Document GT-RF/72-3), par le N.B.S. (Document GT-RF/72-7A) et des propositions faites par les membres au cours de la réunion. La liste des comparaisons envisagées est donnée ci-après, avec les noms des laboratoires pilotes et des autres participants, que leur engagement soit ferme ou soumis à confirmation.

Programme des futures comparaisons

1. *Comparaisons décidées*

Dans cette liste, les laboratoires pilotes sont en caractères gras et les laboratoires dont la participation est soumise à confirmation sont entre parenthèses.

Déphasage sur guide d'ondes WR 90 aux fréquences 9,0, 9,8 ou 10,0 et 11,2 GHz	} NBS , NSL , RRE , (NRC)
Affaiblissement à la fréquence de 7,0 GHz en coaxial	} NPL , PTB , RIND , NBS , (IEN)

Tension sur coaxial à la fréquence de 1 MHz	}	NPL, PTB, NBS, NSL
Puissance sur guide d'ondes WR 12 ou WR 15 à la fréquence de 65 GHz		
Puissance sur guide d'ondes WR 28	}	NRC, ETL, RRE, (NBS)
Puissance en coaxial (14 mm) à la fréquence de 6 GHz		
Champ électrique (75-150 MHz)	}	NBS, IEN
Gain d'un cornet à la fréquence de 10 GHz		
Affaiblissement aux basses valeurs à la fréquence de 10 GHz	}	PTB, NSL, IEN, RIND, RRE, OMH
Affaiblissement à la fréquence de 30 MHz		
		NSL, NRC, NPL, ETL, PTB

Cette comparaison fait suite à la comparaison non concluante dont il a été question au paragraphe I.5. Elle comprendra un étalon voyageur de grand affaiblissement (80-100 dB) qui ne sera pas nécessairement mesuré par tous les participants.

Puissance surfacique	}	NSL, IEN, (NBS), (RIND), (NPL), (NRC)
Bruit (blanc) de température basse (77 K) à la fréquence de 4 GHz sur guide d'ondes		
		RRE, ETL

Puissance laser à ondes entretenues

Le NBS, l'ETL et le NPL expriment leur intérêt pour les comparaisons des puissances laser aux longueurs d'ondes de 632,8, 514 et 488 nm. L'ETL en sera le laboratoire pilote, bien qu'il ne soit pas encore équipé d'un laser à l'argon convenable. La comparaison aura lieu suivant un calendrier fixé et à des fréquences choisies par accord entre les participants.

2. Comparaisons ajournées

Les comparaisons suivantes sont considérées comme désirables, mais elles n'ont pu être organisées effectivement pour diverses raisons.

Bruit (blanc) en coaxial aux fréquences de 1 à 8 GHz	}	Le NBS, le NRC, le RRE et le NSL désirent y prendre part, mais n'auront pas les équipements nécessaires avant au moins deux ans. Chaque laboratoire informera les autres quand il sera prêt et donnera des renseignements sur son programme de recherche dès qu'il le pourra.
Champ magnétique (1-30 MHz)		
Puissance et énergie de laser en impulsion	}	Le NBS, l'IEN et le NRC désirent y prendre part; ils discuteront pour choisir le laboratoire pilote et informeront le BIPM du résultat. Le NBS, l'ETL et le NPL expriment leur intérêt pour la comparaison des mesures de puissance et d'énergie sur des lasers à 1 060 nm (YAG-néodyme). Aucun laboratoire pilote n'est désigné, mais le Groupe de travail note que l'organisation dans un proche avenir d'une comparaison officielle entre le NBS et le NPL est en bonne voie, tandis que l'ETL ne sera pas en mesure d'y participer avant quelque temps. La question est laissée en suspens.
Comparaison en coaxial 75 Ω		
		Le Groupe de travail note l'intérêt croissant pour les mesures précises en coaxial 75 Ω; d'ici à la prochaine réunion il pourrait bien être souhaitable d'organiser des comparaisons de mesures de ce type. Plusieurs laboratoires expriment le désir d'y participer.

3. Comparaisons non retenues

Les comparaisons suivantes sont proposées par les laboratoires cités; aucun autre laboratoire n'appuyant les propositions, il n'en est pas discuté plus avant. Il s'agit de :

— Facteur de surtension des bobines d'inductance aux fréquences de 1 à 50 MHz (NBS).

— Bruit (blanc) de température moyenne sur guide d'ondes WR 15 (58-64 GHz) (NBS).

— Affaiblissement sur guide d'ondes WR 12 (60-90 GHz) (NPL).

IV. Questions diverses

Connecteurs coaxiaux. — Le Groupe de travail note qu'il existe plusieurs types de connecteurs coaxiaux pour ligne de 75 Ω et estime important que les connecteurs utilisés pour les mesures de précision soient autant que possible compatibles entre eux. Il n'incombe pas au Groupe de travail de formuler à ce sujet une recommandation officielle, mais les membres doivent à titre individuel porter cette question à la connaissance des organismes nationaux et internationaux de normalisation.

Il est convenu que dans la mesure du possible le Groupe de travail envisage de se réunir en 1975.

Le Rapporteur,
A. E. BAILEY

Le Président,
F. J. LEHANY

*Recommandations
du Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences
présentées
au Comité Consultatif d'Électricité*

Confirmation des objectifs des comparaisons internationales

RECOMMANDATION GT-RF 1 (1972) *

Dans le paragraphe III de sa Recommandation GT-RF 3 de 1968, le Groupe de travail reconnaissait que les comparaisons internationales avaient deux objectifs :

« 1° Établir l'état d'avancement dans l'exactitude des diverses mesures effectuées par les laboratoires ayant une position avancée dans ces domaines et faire progresser les techniques correspondantes.

« 2° Permettre ensuite aux autres laboratoires de contrôler l'exactitude de leurs mesures, en utilisant certains des instruments voyageurs ou en profitant des résultats obtenus avec ces instruments.

A la lumière de l'expérience acquise depuis 1968 le Groupe de travail confirme sa Recommandation :

« que ces autres laboratoires et les laboratoires participant à une comparaison sont invités à entrer en rapport afin que ce deuxième objectif soit atteint. »

Les laboratoires participant à une comparaison supplémentaire de ce type devront fournir un bref rapport au laboratoire pilote de la comparaison initiale et au B.I.P.M.

Communication des résultats des comparaisons

RECOMMANDATION GT-RF 2 (1972) *

Dans sa Recommandation GT-RF 6 de 1968, le Groupe de travail recommandait que chaque laboratoire communique sans délai à tous les participants, ainsi qu'au B.I.P.M., les résultats des mesures qu'il a effectuées ; l'expérience a montré que ce procédé avait des inconvénients.

Le Groupe de travail recommande maintenant que le laboratoire pilote d'une comparaison communique les résultats seulement au B.I.P.M. et à ceux des laboratoires qui ont déjà terminé leurs mesures.

* Cette Recommandation a été approuvée par le C.C.E. à sa 13^e session (octobre 1972) et par le C.I.P.M. à sa 61^e session (octobre 1972).

ANNEXE E 1

Documents de travail présentés à la 13^e session du C.C.E. (*)

Document
CCE/

Comparaisons internationales

- 72-1 B.I.P.M.- Rapport sur la 12^e comparaison des étalons nationaux de résistance électrique (décembre 1969-mars 1970), par G. Leclerc (voir Annexe E 2).
- 72-2 B.I.P.M.- Rapport sur la 12^e comparaison des étalons nationaux de force électromotrice (janvier - février 1970), par G. Leclerc (voir Annexe E 3).
- 72-17 B.I.P.M.- Etat d'avancement de la comparaison internationale circulaire des étalons de capacité en silice de 10 pF, par G. Leclerc (voir Annexe E 4).

A ce document étaient joints un rapport du D.A.M.W. et un rapport de l'I.M.M. sur leurs mesures dont les résultats sont donnés dans l'Annexe E 4.

(*) Les documents non publiés en Annexes à ce volume peuvent être obtenus sur demande adressée au B.I.P.M.

Document

CCE/

- 72-19 I.E.N. (Italie).- Etude des condensateurs étalons en silice de 10 pF engagés dans la comparaison internationale, par E. Arri et F. Cabiati.

Les résultats de l'I.E.N. mentionnés dans ce document sont donnés dans l'Annexe E 4.

Enceintes thermorégulées transportables pour piles étalons

- 72-16 B.I.P.M.- Comportement d'une enceinte thermorégulée en fonction de la température ambiante, par G. Leclerc (voir Annexe E 5).

Déterminations absolues

- 72-5 N.P.L. (Royaume-Uni).- Brève note sur la situation de travaux : électrodynamomètre (balance type Ayrton-Jones) et coefficient gyromagnétique du proton.
- 72-7 N.B.S. (Etats-Unis d'Amérique).- Progress report on the N.B.S. absolute volt experiment, by F.K. Harris (voir Annexe E 6).
- 72-8 N.B.S. (Etats-Unis d'Amérique).- Progress report on the N.B.S. absolute farad and ohm experiment, by R.D. Cutkosky.
- 72-10 E.T.L. (Japon).- Absolute measurement of voltage by an electrostatic energy-changing method, by T. Yamazaki, K. Shida and M. Kanno.

Publié dans *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IM-21, N° 4, 1972, pp. 372-375.

- 72-15 E.T.L. (Japon).- Theory and experiment on magnetically isolated calculable solenoid for γ'_p determination, by H. Nakamura, K. Hara and A. Nakamura.

Ce document résume deux rapports déjà publiés (A γ'_p determination at the ETL ; two proposals for obtaining a uniform calculable magnetic field for an atomic standard of current, In "Conference on Precision Measurement and Fundamental Constants", Gaithersburg, 1970, *NBS Special*

Document

CCE/

Publ. 343, 1971, p. 123.- A MICS for γ'_p determination, In "Fourth Internat. Conference on Atomic Masses and Fundamental Constants", Teddington, 1971, Proceedings, 1972, p. 462) et les résultats des premiers essais qui mettent en évidence l'importance de l'aimantation résiduelle des écrans magnétiques.

- 72-18 N.P.L. (Royaume-Uni).- Calculable capacitor, by G.H. Rayner.

Voir l'article publié dans *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IM-21, N° 4, 1972, pp. 361-365.

- 72-22 L.C.I.E. (France).- Etalons calculés de capacité électrique, par N. Elnékavé (voir Annexe E 7).

Contrôle de la permanence des étalons de référence de f.é.m.

Valeur de 2 e/h

- 72-3 N.S.L. (Australie).- Contrôle de l'étalon de f.é.m. du N.S.L. au moyen de l'effet Josephson alternatif, par I.K. Harvey, J.C. Macfarlane et R.B. Frenkel.

Voir l'article publié en anglais dans *Metrologia*, 8, N° 3, 1972, pp. 114-124.

- 72-4 P.T.B. (Allemagne).- Référence de tension électrique par l'effet Josephson, par V. Kose, F. Melchert, H. Fack et W. Hetzel (voir Annexe E 8).

- 72-6 N.B.S. (Etats-Unis d'Amérique).- Progress report on maintenance of the U.S. legal volt via the AC Josephson effect, by B.F. Field (voir Annexe E 9).

- 72-14 E.T.L. (Japon).- Preparation of Sn-SnO-Sn Josephson junction for 2 e/h determination, by T. Endo, S. Koga, K. Hara and A. Nakimura.

Note sur l'avancement des travaux à l'E.T.L. Les jonctions Sn-SnO-Sn en couche mince sont obtenues par évaporation sous vide de Sn, oxydation sous atmosphère d'oxygène (10 à 20 h à température ordinaire, puis 1 à 2 h à environ 100 °C), puis nouvelle évaporation de Sn ; la jonction est ensuite recouverte d'un vernis "photoresist".

Document

CCE/

Pour une surface de jonction de $0,92 \times 0,24 \text{ mm}^2$, la résistance normale est de $36,8 \text{ m}\Omega$.

On a observé des échelons jusqu'au rang 135 correspondant à une tension continue de $2,52 \text{ mV}$ pour une puissance de 300 mW à $9,028 \text{ GHz}$.

- 72-21 L.C.I.E. (France).- Référence de tension utilisant l'effet Josephson alternatif, par F. Delahaye (voir Annexe E 10).
- 72-24 N.P.L. (Royaume-Uni).- The numerical value of the constant $2 e/h$, by J.J. Denton (voir Annexe E 11).
- 72-25 N.B.S. (Etats-Unis d'Amérique).- The N.B.S. volt transfer program, by W.G. Eicke, Jr.

Passage courant continu - courant alternatif

- 72-11 E.T.L. (Japon).- On the international comparison of AC-DC thermal converters.
- 72-13 E.T.L. (Japon).- AC-DC thermal converters, by S. Iwamoto and H. Hirayama (voir Annexe E 12).
- 72-23 N.P.L. (Royaume-Uni).- Outline of N.P.L. AC/DC transfer standards and comparator system (voir Annexe E 13).

Divers

- 72-20 I.E.N. (Italie).- Version améliorée du pont auto-étalonnable à diviseur inductif, utilisé pour la comparaison d'étalons d'inductance, par E. Arri et G. Noce (voir Annexe E 14).
- 72-9 E.T.L. (Japon).- Standard cells with Cd-Pb amalgam electrode, by H. Hirayama and K. Shimazaki.

Publié dans *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IM-21, N° 4, 1972, pp. 319-323.

Document

CCE/

- 72-12 E.T.L. (Japon).- Automatic measuring system for a control of standard cells, by H. Hirayama and Y. Murayama.

Publié dans *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IM-21, N° 4, 1972, pp. 379-384.

GROUPE DE TRAVAIL
POUR LES GRANDEURS AUX RADIOFRÉQUENCES

Document

GT-RF/

- 72-1 Preferred frequencies for calibration and measurement, by G.J. Halford.

Voir le Paper No. 3 présenté à la "IERE/IEE Joint Conference on RF Measurements and Standards", N.P.L., Teddington, 14-16 Nov. 1967.

- 72-2 N.S.L. (Australie).- Rapport provisoire sur la comparaison internationale de l'affaiblissement à la fréquence de 30 MHz, par D.L. Hollway.

- 72-3 I.M.M. (U.R.S.S.).- Suggestions sur les questions de l'ordre du jour de la réunion du Groupe de travail.

- 72-4 P.T.B. (Allemagne).- Etat actuel du développement des instruments de mesure pour les grandeurs aux radiofréquences à la P.T.B., par H. Bayer.

- 72-5 E.T.L. (Japon).- First international intercomparison of microwave low power standards at 10 GHz, by R. Ishige (voir Annexe E 15).

- 72-6 N.P.L. (Royaume-Uni).- International comparison of standards attenuation in coaxial transmission line below 8 GHz, by R.W. Yell (voir Annexe E 16).

Document

GT-RF/

- 72-7 N.B.S. (Boulder, Etats-Unis d'Amérique) :
- A) List of N.B.S. proposed HF and microwave intercomparisons (Oct. 1972).
 - B) Final report on the international intercomparison of power standards at 3 GHz in coaxial transmission line, by G.F. Engen and P.A. Hudson (voir Annexe E 17).
 - C) Final report on the international intercomparison of complex permittivity measurement at 9 GHz, by H.E. Bussey (voir Annexe E 18).
 - D) Interim report on the international intercomparison of voltage standards at 1 GHz in coaxial transmission line, by F.X. Ries.
- 72-8 R.I.N.D. (Suède).- Some comments on the recently finished international comparison of waveguide attenuators at 10 GHz.
- 72-9 R.R.E. (Royaume-Uni).- International comparisons of standards : a trilateral power intercomparison at 9 GHz, by C.R. Ditchfield.
- 72-10 L.C.I.E. (France).- Comparaison internationale d'étalons de puissance à 10 GHz.
-

ANNEXE E 2

Rapport sur la 12^e comparaison des étalons nationaux de résistance électrique

(décembre 1969 — mars 1970)

Par G. LECLERC

Bureau International des Poids et Mesures

(Document CCE/72-1)

Les dix laboratoires invités par le Comité International des Poids et Mesures à participer à la 12^e comparaison des étalons nationaux de résistance électrique ont fait parvenir à Sèvres trente étalons de 1 Ω de premier ordre : en manganine ou en alliage or-chrome, à quatre bornes, étanches, à coefficient de température faible bien connu (tableau I). Pendant toute la durée de leur séjour au B.I.P.M. ces étalons ont été conservés dans un bain d'huile de paraffine à $20 \pm 0,2$ °C.

Les mesures ont été faites par un seul observateur au moyen d'un pont double de Thomson (à bras de 1000 Ω), par la méthode de substitution (les deux étalons comparés au cours d'une série d'observations étant à tour de rôle opposés à une résistance tare ajustable), en utilisant un courant de 0,1 A. Au milieu de chaque série d'observations les bras "mesure" et "tare" du pont étaient inversés. Enfin, on a employé lors des mesures "retour" des "résistances tare" et des "boîtes-shunt" différentes de celles qui étaient employées au cours des mesures "aller".

SCHÉMA DE COMPARAISON

Le B.I.P.M. ayant engagé dans la comparaison cinq des six étalons qui maintiennent la valeur de référence Ω_{69-BI} , nous

TABLEAU I

*Liste des étalons nationaux de résistance qui ont participé
à la 12^e comparaison (1969-1970)*

<u>Laboratoires</u>	<u>Étalons Nos</u>	<u>Arrivée B.I.P.M.</u>	<u>Départ B.I.P.M.</u>	<u>Mode de transport</u>
D.A.M.W. (Allemagne Zone Est)	102-56 107/57	27 octobre 1969	20 juin 1970	aller et retour par avion accompagnés
P.T.B. (Allemagne Zone Ouest)	166 266	12 novembre 1969	30 mai 1970	aller et retour par avion accompagnés
N.E.S. (Etats-Unis d'Amérique)	72 73	29 octobre 1969	17 mars 1970	aller et retour par avion accompagnés à l'aller en fret au retour
N.S.L. (Australie)	S- 4448 S-41695 S-41696 S-41697	9 novembre 1969	18 mars 1970	aller et retour par avion en fret
N.R.C. (Canada)	1029331 1336435 1336436 1336437	12 octobre 1969	4 avril 1970	aller et retour par avion accompagnés
L.C.I.E. (France)	1645271 1645274 1645276	5 décembre 1969	10 avril 1970	aller et retour par la route accompagnés
I.E.N. (Italie)	755518 1527399 1681955	14 novembre 1969	6 avril 1970	aller et retour par avion accompagnés
E.T.L. (Japon)	3905017 31002 5796 5799	12 novembre 1969	26 mars 1970	aller et retour par avion en fret
N.P.L. (Royaume-Uni)	713 716	26 novembre 1969	18 mars 1970	aller et retour par avion accompagnés
I.M.M. (U.R.S.S.)	710 922 951 2523	6 octobre 1969	1 ^{er} juin 1970	aller et retour par avion accompagnés

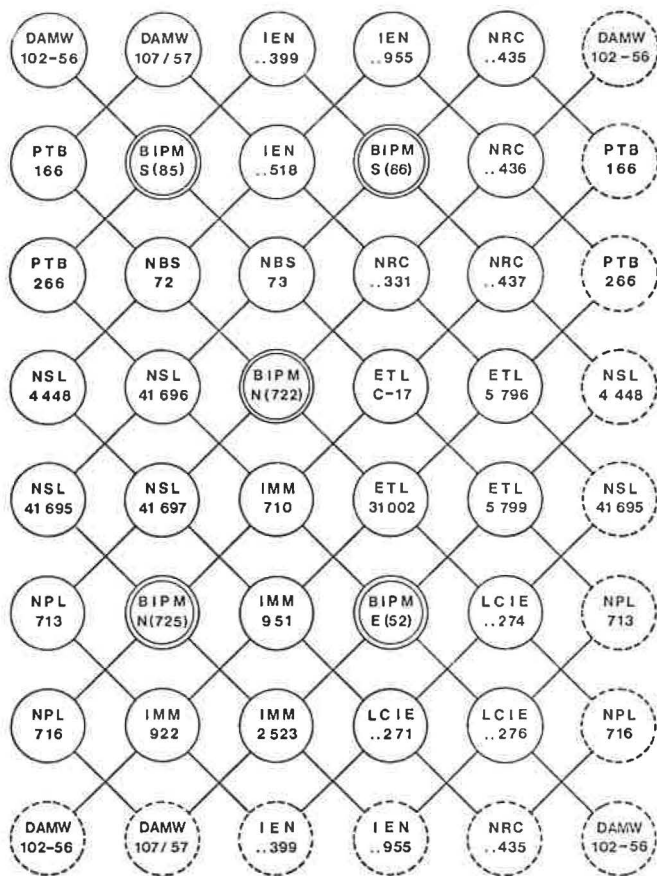


Fig. 1. — Schéma de comparaison des étalons de résistance.
 Les étalons du B.I.P.M. sont identifiés par un double cercle.

avons eu à comparer au total trente-cinq étalons. La comparaison a été effectuée conformément au schéma de la figure 1 ; ce schéma a été choisi parmi six schémas établis à priori parce qu'il conduisait, pour un même nombre de mesures, aux incertitudes les plus faibles.

Les mesures "aller" ont été effectuées du 15 décembre 1969 au 17 janvier 1970 à une température moyenne de 20,032 °C et les mesures "retour" du 16 février au 15 mars 1970, à une température moyenne de 19,969 °C.

RÉDUCTION DES OBSERVATIONS. RÉSULTATS

Le schéma de comparaison utilisé a fourni 70 équations de condition, chaque équation étant la moyenne d'une mesure "aller" et de la mesure "retour" correspondante, effectuées à peu près symétriquement dans le temps par rapport au 1^{er} février 1970. Ces 70 équations, traitées par la méthode des moindres carrés, ont donné, à partir des valeurs connues des étalons du B.I.P.M., celles des étalons nationaux voyageurs exprimées en fonction de Ω_{69-BI} . Les calculs ont été effectués par l'ordinateur du B.I.P.M. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau II.

Les opérations qui ont permis ensuite de rattacher chaque "unité nationale"⁽¹⁾ à Ω_{69-BI} sont reproduites dans les tableaux III et IV.

Le tableau V contient les résultats finaux de la 12^e comparaison.

PRÉCISION

Nous ne connaissons avec certitude que la précision des mesures faites au B.I.P.M. : les valeurs des étalons voyageurs, exprimées en fonction de Ω_{69-BI} , sont connues avec un écart-type de 0,042 $\mu\Omega$.

(1) Dans ce rapport, "unité nationale", " Ω_{NPL} ", ... désignent la grandeur de 1 ohm qui résulte de la valeur assignée par un laboratoire aux étalons qui lui servent à maintenir ou à représenter matériellement l'unité de résistance. Cette façon de s'exprimer est impropre, mais elle a l'avantage d'être brève et bien comprise des principaux intéressés qui, pour la plupart, l'utilisent habituellement.

TABLEAU II

*Valeurs à 20 °C des étalons, exprimées en fonction de Ω_{69-BI} ,
à la date du 1^{er} février 1970*

<u>D.A.M.W.</u>		<u>I.E.N.</u>	
N ^{os}	102-56 = 1,000 009 54 Ω_{69-BI}	N ^{os}	755518 = 0,999 973 31 Ω_{69-BI}
	107/57 = 0,999 996 77 Ω_{69-BI}		1527399 = 0,999 964 00 Ω_{69-BI}
	<u>1,000 003 16 Ω_{69-BI}</u>		1681955 = 0,999 976 07 Ω_{69-BI}
			<u>0,999 971 13 Ω_{69-BI}</u>
<u>P.T.B.</u>		<u>E.T.L.</u>	
	166 = 0,999 993 05 Ω_{69-BI}		3905C17 = 1,000 014 10 Ω_{69-BI}
	266 = 0,999 987 05 Ω_{69-BI}		31002 = 1,000 439 38 Ω_{69-BI}
	<u>0,999 990 05 Ω_{69-BI}</u>		5796 = 0,999 931 51 Ω_{69-BI}
			5799 = 0,999 896 25 Ω_{69-BI}
			<u>1,000 070 31 Ω_{69-BI}</u>
<u>N.B.S.</u>		<u>N.P.L.</u>	
	72 = 1,000 010 28 Ω_{69-BI}		713 = 1,000 048 17 Ω_{69-BI}
	73 = 1,000 012 39 Ω_{69-BI}		716 = 1,000 532 94 Ω_{69-BI}
	<u>1,000 011 34 Ω_{69-BI}</u>		<u>1,000 290 56 Ω_{69-BI}</u>
<u>N.S.L.</u>		<u>I.M.M.</u>	
S- 4448	= 1,000 006 21 Ω_{69-BI}		710 = 0,999 997 25 Ω_{69-BI}
S-41695	= 0,999 986 73 Ω_{69-BI}		922 = 1,000 013 96 Ω_{69-BI}
S-41696	= 0,999 988 50 Ω_{69-BI}		951 = 0,999 990 69 Ω_{69-BI}
S-41697	= 0,999 988 58 Ω_{69-BI}		2523 = 0,999 992 01 Ω_{69-BI}
	<u>0,999 992 50 Ω_{69-BI}</u>		<u>0,999 998 48 Ω_{69-BI}</u>
<u>N.R.C.</u>		<u>B.I.F.M.</u>	
1029331	= 0,999 984 59 Ω_{69-BI}		S(85) = 1,000 016 02 Ω_{69-BI}
1336435	= 0,999 994 13 Ω_{69-BI}		S(86) = 1,000 014 12 Ω_{69-BI}
1336436	= 0,999 992 00 Ω_{69-BI}		N(722) = 1,000 031 28 Ω_{69-BI}
1336437	= 0,999 993 29 Ω_{69-BI}		N(725) = 0,999 999 68 Ω_{69-BI}
	<u>0,999 991 00 Ω_{69-BI}</u>		E(52) = 1,000 073 54 Ω_{69-BI}
			<u>1,000 026 93 Ω_{69-BI}</u>
<u>L.C.I.E.</u>			
1645271	= 0,999 974 90 Ω_{69-BI}		
1645274	= 0,999 974 71 Ω_{69-BI}		
1645276	= 0,999 976 15 Ω_{69-BI}		
	<u>0,999 975 25 Ω_{69-BI}</u>		

Valeurs à 20 °C des étalons, imprimées en "unités nationale"
du laboratoire d'origine, à la date du 1^{er} février 1970

Les valeurs au 1^{er} février 1970, date centrale de la comparaison, ont été calculées par interpolation linéaire à partir des valeurs attribuées aux étalons par les laboratoires nationaux avant et après les mesures au B.I.P.M.

<u>D.A.M.W.</u>			
	15 octobre 1969	30 juin 1970	1 ^{er} février 1970
102-56	1,000 009 6	1,000 009 6	1,000 009 60 Ω_{DAMW}
107/57	0,999 996 3	0,999 996 8	0,999 996 51 Ω_{DAMW}
	<u>1,000 002 95</u>	<u>1,000 003 20</u>	<u>1,000 003 06</u> Ω_{DAMW}

<u>P.T.B.</u>			
	1 ^{er} novembre 1969	7 juillet 1970	
166	0,999 992 7	0,999 992 8	0,999 992 74 Ω_{PTB}
266	0,999 986 6	0,999 986 9	0,999 986 71 Ω_{PTB}
	<u>0,999 989 65</u>	<u>0,999 989 85</u>	<u>0,999 989 72</u> Ω_{PTB}

<u>N.B.S.</u>			
	3 octobre 1969	20 avril 1970	
72	1,000 010 16	1,000 010 13	1,000 010 14 Ω_{NES}
73	1,000 012 56	1,000 012 41	1,000 012 47 Ω_{NES}
	<u>1,000 011 36</u>	<u>1,000 011 27</u>	<u>1,000 011 31</u> Ω_{NES}

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>			
	22 octobre 1969	17 avril 1970	
S-4448	1,000 005 8	1,000 005 9	1,000 005 86 Ω_{NSL}
S-41695	0,999 986 4	0,999 986 4	0,999 986 40
S-41696	0,999 988 2	0,999 988 2	0,999 988 20
S-41697	0,999 983 4	0,999 983 4	0,999 988 40
	<u>0,999 992 20</u>	<u>0,999 992 25</u>	<u>0,999 992 21</u> Ω_{NSL}

<u>M.R.C.</u>			
	7 octobre 1969	7 mai 1970	
1029331	0,999 985 2	0,999 985 1	0,999 985 14 Ω_{MRC}
1336435	0,999 994 8	0,999 994 5	0,999 994 63
1336436	0,999 992 6	0,999 992 2	0,999 992 38
1336437	0,999 995 8	0,999 993 7	0,999 993 74
	<u>0,999 991 60</u>	<u>0,999 991 37</u>	<u>0,999 991 47</u> Ω_{MRC}

<u>L.C.I.E.</u>			
	18 août 1969	1 ^{er} septembre 1970	1 ^{er} février 1970
1645271	0,999 974 6	0,999 974 3	0,999 974 47 Ω_{LCIE}
1645274	0,999 974 4	0,999 974 7	0,999 974 53
1645276	0,999 975 9	0,999 975 8	0,999 975 86
	<u>0,999 974 97</u>	<u>0,999 974 95</u>	<u>0,999 974 95</u> Ω_{LCIE}

<u>I.E.N.</u>			
	11 novembre 1969	29 avril 1970	
755518	0,999 972 57	0,999 972 57	0,999 972 57 Ω_{IEN}
1527399	0,999 963 17	0,999 963 36	0,999 963 26
1681955	0,999 975 25	0,999 975 17	0,999 975 21
	<u>0,999 970 33</u>	<u>0,999 970 37</u>	<u>0,999 970 35</u> Ω_{IEN}

<u>E.T.L.</u>			
	26 octobre 1969	25 avril 1970	
3905C17	1,000 014 17	1,000 014 23	1,000 014 20 Ω_{ETL}
31002	1,000 439 60	1,000 439 73	1,000 439 67
5796	0,999 931 57	0,999 931 86	0,999 931 73
5799	0,999 896 32	0,999 896 47	0,999 896 40
	<u>1,000 070 41₅</u>	<u>1,000 070 57</u>	<u>1,000 070 50</u> Ω_{ETL}

<u>N.P.L.</u>			
	30 octobre 1969	13 mai 1970	
713	1,000 047 8	1,000 047 9	1,000 047 85 Ω_{NPL}
716	1,000 532 5	1,000 532 8	1,000 532 64
	<u>1,000 290 15</u>	<u>1,000 290 35</u>	<u>1,000 290 25</u> Ω_{NPL}

<u>I.M.M.</u>			
	septembre 1969	juin 1970	
710	0,999 997 2	0,999 997 2	0,999 997 20 Ω_{IMM}
922	1,000 014 1	1,000 014 1	1,000 014 10
951	0,999 989 7	0,999 990 1	0,999 989 90
953	0,999 000 1	0,999 000 1	0,999 000 10

TABLEAU IV

Valeur de l' "unité nationale" de chaque laboratoire en fonction de Ω_{69-BI}

<u>D.A.M.W.</u>									
102-56	1,000 009 60	Ω_{DAMW}	= 1,000 009 54	Ω_{69-BI}	d' où $\Omega_{DAMW} = \Omega_{69-BI} - 0,06$	$\mu\Omega$			
107/57	0,999 996 51		= 0,999 996 77			+0,26			
	1,000 003 06	Ω_{DAMW}	= 1,000 003 16	Ω_{69-BI}	d' où $\Omega_{DAMW} = \Omega_{69-BI} + 0,10$	$\mu\Omega$			
<u>P.T.B.</u>									
166	0,999 992 74	Ω_{PTB}	= 0,999 993 05	Ω_{69-BI}	d' où $\Omega_{PTB} = \Omega_{69-BI} + 0,31$	$\mu\Omega$			
266	0,999 986 71		= 0,999 987 05			+0,34			
	0,999 989 72	Ω_{PTB}	= 0,999 990 05	Ω_{69-BI}	d' où $\Omega_{PTB} = \Omega_{69-BI} + 0,33$	$\mu\Omega$			
<u>N.B.S.</u>									
72	1,000 010 14	Ω_{NBS}	= 1,000 010 28	Ω_{69-BI}	d' où $\Omega_{NBS} = \Omega_{69-BI} + 0,14$	$\mu\Omega$			
73	1,000 012 47		= 1,000 012 39			-0,08			
	1,000 011 31	Ω_{NBS}	= 1,000 011 34	Ω_{69-BI}	d' où $\Omega_{NBS} = \Omega_{69-BI} + 0,03$	$\mu\Omega$			
<u>N.S.L.</u>									
S- 4448	1,000 005 86	Ω_{NSL}	= 1,000 006 21	Ω_{69-BI}	d' où $\Omega_{NSL} = \Omega_{69-BI} + 0,35$	$\mu\Omega$			
S-41695	0,999 986 40		= 0,999 986 73			+0,33			
S-41696	0,999 988 20		= 0,999 988 50			= +0,30			
S-41697	0,999 988 40		= 0,999 988 58			= +0,18			
	0,999 992 21	Ω_{NSL}	= 0,999 992 50	Ω_{69-BI}	d' où $\Omega_{NSL} = \Omega_{69-BI} + 0,29$	$\mu\Omega$			
<u>N.R.C.</u>									
1029331	0,999 985 14	Ω_{NRC}	= 0,999 984 59	Ω_{69-BI}	d' où $\Omega_{NRC} = \Omega_{69-BI} - 0,55$	$\mu\Omega$			
1336435	0,999 994 63		= 0,999 994 13			+0,50			
1336436	0,999 992 38		= 0,999 992 00			= -0,38			
1336437	0,999 993 74		= 0,999 993 29			= -0,45			
	0,999 991 47	Ω_{NRC}	= 0,999 991 00	Ω_{69-BI}	d' où $\Omega_{NRC} = \Omega_{69-BI} - 0,47$	$\mu\Omega$			
<u>L.C.I.E.</u>									
1645271	0,999 974 47	Ω_{LCIE}	= 0,999 974 90	Ω_{69-BI}	d' où $\Omega_{LCIE} = \Omega_{69-BI} + 0,43$	$\mu\Omega$			
1645274	0,999 974 53		= 0,999 974 71			+0,18			
1645276	0,999 975 86		= 0,999 976 15			= +0,29			
	0,999 974 95	Ω_{LCIE}	= 0,999 975 25	Ω_{69-BI}	d' où $\Omega_{LCIE} = \Omega_{69-BI} + 0,30$	$\mu\Omega$			
<u>I.E.N.</u>									
755518	0,999 972 57	Ω_{IEN}	= 0,999 973 31	Ω_{69-BI}	d' où $\Omega_{IEN} = \Omega_{69-BI} + 0,74$	$\mu\Omega$			
1527399	0,999 963 26		= -0,999 964 00			+0,74			
1681955	0,999 975 21		= 0,999 976 07			= +0,86			
	0,999 970 35	Ω_{IEN}	= 0,999 971 13	Ω_{69-BI}	d' où $\Omega_{IEN} = \Omega_{69-BI} + 0,78$	$\mu\Omega$			
<u>E.T.L.</u>									
3905C17	1,000 014 20	Ω_{ETL}	= 1,000 014 10	Ω_{69-BI}	d' où $\Omega_{ETL} = \Omega_{69-BI} - 0,10$	$\mu\Omega$			
31002	1,000 439 67		= 1,000 439 38			-0,29			
5796	0,999 931 73		= 0,999 931 51			= -0,22			
5799	0,999 896 40		= 0,999 896 25			= -0,15			
	1,000 070 50	Ω_{ETL}	= 1,000 070 31	Ω_{69-BI}	d' où $\Omega_{ETL} = \Omega_{69-BI} - 0,19$	$\mu\Omega$			
<u>N.P.L.</u>									
713	1,000 047 85	Ω_{NPL}	= 1,000 048 17	Ω_{69-BI}	d' où $\Omega_{NPL} = \Omega_{69-BI} + 0,32$	$\mu\Omega$			
716	1,000 532 64		= 1,000 532 94			+0,30			
	1,000 290 25	Ω_{NPL}	= 1,000 290 56	Ω_{69-BI}	d' où $\Omega_{NPL} = \Omega_{69-BI} + 0,31$	$\mu\Omega$			
<u>I.M.M.</u>									
710	0,999 997 20	Ω_{IMM}	= 0,999 997 25	Ω_{69-BI}	d' où $\Omega_{IMM} = \Omega_{69-BI} + 0,05$	$\mu\Omega$			
922	1,000 014 10		= 1,000 013 96			-0,14			
2523	0,999 991 95		= 0,999 992 01			= +0,06			
	1,000 001 08	Ω_{IMM}	= 1,000 001 07	Ω_{69-BI}	d' où $\Omega_{IMM} = \Omega_{69-BI} - 0,01$	$\mu\Omega$			

L'étalon N° 951 qui fournissait un résultat manifestement anormal a été éliminé en accord avec l'I.M.M.

TABLEAU V

Résultats de la 12^e comparaison

(au 1^{er} février 1970)

Allemagne	{ (D.A.M.W.)	Ω_{DAMW}	=	$\Omega_{69\text{-BI}}$	+ 0,10 $\mu\Omega$
	{ (P.T.B.)	$\Omega_{\text{PTB-69}}$	=		+ 0,33
Australie	(N.S.L.)	$\Omega_{\text{NSL-69}}$	=		+ 0,29
Canada	(N.R.C.)	$\Omega_{\text{NRC-69}}$	=		- 0,47
Etats-Unis d'Amérique	(N.B.S.)	Ω_{NBS}	=		+ 0,03
France	(L.C.I.E.)	$\Omega_{\text{LCIE-69}}$	=		+ 0,30
Italie	(I.E.N.)	Ω_{IEN}	=		+ 0,78
Japon	(E.T.L.)	Ω_{ETL}	=		- 0,19
Royaume-Uni	(N.P.L.)	$\Omega_{\text{NPL-69}}$	=		+ 0,31
U.R.S.S.	(I.M.M.)	Ω_{IMM}	=		- 0,01

Par contre, nous ignorons avec quelle précision sont connues les valeurs des étalons voyageurs en fonction des "unités nationales", cette précision n'étant pas indiquée dans les certificats des laboratoires ; de plus, ces valeurs peuvent subir des variations accidentelles du fait du transport des étalons.

Pour calculer néanmoins un ordre de grandeur de la précision avec laquelle sont connus les résultats de cette 12^e comparaison, nous avons considéré la dispersion des résultats fournis par les différents étalons engagés dans la comparaison par chaque laboratoire.

En admettant que tous les étalons voyageurs étaient de qualité métrologique identique, qu'ils avaient été transportés avec le même soin, que la précision des étalonnages effectués dans les divers laboratoires nationaux était la même, nous avons calculé, pour chaque laboratoire, la valeur de l'expression

$$\sqrt{\frac{\sum \epsilon^2}{(n - p)q}}$$

dans laquelle

ϵ = écart entre ($\Omega_{\text{lab}} - \Omega_{69\text{-BI}}$) fourni par un étalon et la valeur moyenne admise pour le laboratoire (tableau IV) ;

n = 30 = nombre des étalons voyageurs ;

p = 10 = nombre de laboratoires ;

q = nombre d'étalons engagés par le laboratoire considéré.

Nous avons ainsi obtenu les incertitudes suivantes :

0,072 $\mu\Omega$ pour $q = 2$

0,059 $\mu\Omega$ pour $q = 3$

0,051 $\mu\Omega$ pour $q = 4$

CONCLUSION

Il est satisfaisant de constater qu'à la suite des ajustements effectués le 1^{er} janvier 1969, les "unités nationales" de résistance des grands laboratoires coïncident à mieux que 1×10^{-6} près.

Il est cependant permis de penser que cette concordance pourra être encore améliorée lorsque tous les laboratoires utiliseront comme point de départ une détermination absolue de l'ohm au moyen d'un condensateur calculable du type "condensateur en croix".

Rapport
sur la 12^e comparaison des étalons nationaux
de force électromotrice

(janvier — février 1970)

Par G. LECLERC

Bureau International des Poids et Mesures

(Document CCE/72-2)

Pour cette comparaison, les dix laboratoires nationaux ont envoyé au B.I.P.M. 66 piles étalons au sulfate de cadmium du type saturé (tableau I). La plupart ont fait parvenir des piles nues, transportées dans des emballages non climatisés ; cependant, le Conseil National de Recherches (N.R.C.) et le National Bureau of Standards (comme groupe voyageur N° 2) ont utilisé chacun un groupe de quatre piles conservées en permanence à 30 °C dans une enceinte à air thermorégulée.

Dès leur arrivée au B.I.P.M., toutes les piles (sauf bien entendu celles qui étaient enfermées dans des enceintes thermorégulées) ont été immergées dans la cuve à bain d'huile mise en service en 1968⁽¹⁾ (uniformité de la température au moins égale à 0,000 5 K).

Les mesures ont été effectuées par un seul observateur qui a comparé deux à deux, dans toutes les combinaisons possibles, les douze groupes constitués en ajoutant deux groupes du B.I.P.M. aux dix groupes nationaux voyageurs. (Pour comparer un groupe à un autre on compare directement, en série fermée, les piles du premier groupe à celles du second). Les comparaisons "aller" ont été faites du 12 au 30 janvier à une température moyenne de 20,001 °C et les comparaisons "retour" du 2 au 20 février 1970 à une température moyenne de 19,989 °C.

(1) *Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 36, 1968, p. 53-54.

TABLEAU I

*Liste des étalons nationaux de force électromotrice
qui ont participé à la 12^e comparaison (1970)*

Laboratoires	Étalons N ^{os}	Arrivée B.I.P.M.	Départ B.I.P.M.	Mode de transport
D.A.M.W. (Allemagne Zone Est)	D.251 D.252 D.253 D.254 D.255 D.256	27 octobre 1969	20 juin 1970	aller et retour par avion accompagnés
P.T.B. (Allemagne Zone Ouest)	691 692 693 694 705	12 novembre 1969	30 mai 1970	aller et retour par avion accompagnés
N.E.S. (Etats-Unis d'Amérique)	965 1158 1160 1161 1162 1173	29 octobre 1969	17 mars 1970	aller et retour par avion accompagnés à l'aller en fret au retour
	1-2-3-4	12 février 1970	17 mars 1970	aller et retour par avion en fret
N.S.L. (Australie)	1103 1104 1106 1108 1109 1111	9 novembre 1969	18 mars 1970	aller et retour par avion en fret
N.R.C. (Canada)	1-2-3-4	12 octobre 1969	4 avril 1970	aller et retour par avion accompagnés
L.C.I.E. (France)	7353 7356 7357 7358 7359	5 décembre 1969	10 avril 1970	aller et retour par la route accompagnés
I.E.N. (Italie)	1957 1958 1959 1960 1961 1962	14 novembre 1969	6 avril 1970	aller et retour par avion accompagnés
E.T.L. (Japon)	A. 71 A. 78 A. 82 1047 1054 A. 1806	12 novembre 1969	26 mars 1970	aller et retour par avion en fret
N.P.L. (Royaume-Uni)	529 530 536 537 538 539	26 novembre 1969	18 mars 1970	aller et retour par avion accompagnés
	6215 3241 3507 3514 81 82 5309	23 avril 1970	5 août 1970	aller et retour par avion accompagnés
I.M.M. (U.R.S.S.)	5641 5648 5649 5651 5661	6 octobre 1969	1 ^{er} juin 1970	aller et retour par avion accompagnés

Les 66 équations de condition obtenues en prenant la moyenne des mesures "aller" et des mesures "retour", traitées par la méthode des moindres carrés, ont permis d'exprimer la valeur de chaque groupe national en fonction de V_{69-BI} valeur de référence maintenue au B.I.P.M.

Étude du groupe voyageur N° 2 du N.B.S.

Ce groupe N° 2 (enceinte thermorégulée) n'a été envoyé au B.I.P.M. qu'en février 1970. En effet, il n'avait pas été prévu à l'origine de le faire intervenir dans la comparaison internationale. On souhaitait simplement effectuer, à titre expérimental, un rattachement parallèle de V_{NBS} à V_{69-BI} ⁽²⁾ dans le cadre des études entreprises depuis déjà quelques années pour contrôler les nouvelles possibilités offertes par des piles enfermées dans des enceintes à air thermorégulées comme étalons de transfert du volt. Ce n'est que plus tard que le N.B.S. a décidé de retenir la relation entre V_{NBS} et V_{69-BI} fournie par le groupe N.B.S. N° 2 plutôt que celle qu'avait fournie le groupe de piles nues (N.B.S. N° 1).

Entre le 11 février et le 16 mars 1970, le groupe N° 2 a été comparé aux groupes du B.I.P.M. et à la plupart des autres groupes voyageurs ; sa valeur, exprimée en fonction de V_{69-BI} , a été déduite des valeurs attribuées aux autres groupes.

Étude du groupe voyageur N° 2 du N.P.L.

Pour les piles du groupe voyageur N° 1 du N.P.L., les valeurs des forces électromotrices mesurées au N.P.L. en novembre 1969, avant leur départ, et en avril 1970, après leur retour, étaient très différentes ; bien que toutes les piles de ce groupe se soient bien comportées durant leur séjour au B.I.P.M., il fut décidé de refaire une comparaison de V_{NPL} à V_{69-BI} en utilisant un nouveau groupe de piles (N°2).

(2) Dans ce rapport, "unité nationale", " V_{NPL} ", ... désignent la grandeur de 1 volt qui résulte de la valeur assignée par un laboratoire aux étalons qui lui servent à maintenir ou à représenter matériellement l'unité de force électromotrice. Cette façon de s'exprimer est impropre, mais elle a l'avantage d'être brève et bien comprise des principaux intéressés qui, pour la plupart, l'utilisent habituellement.

En mai 1970, puis en juin-juillet, ce groupe N° 2 fut comparé aux huit groupes (44 piles au total) qui conservent l'unité de force électromotrice au B.I.P.M.

VALEUR DE CHAQUE PILE, EXPRIMÉE EN FONCTION DE V_{69-BI}

La force électromotrice de chaque pile a été déduite de celle qui est attribuée à son groupe (tableau II) en tenant compte de la différence qu'elle présente par rapport à la moyenne de ce groupe (tableau III).

Les opérations qui ont permis ensuite de rattacher chaque "unité nationale" à V_{69-BI} sont reproduites dans les tableaux IV et V.

Le tableau VI contient les résultats finaux de cette 12^e comparaison.

PRÉCISION

Nous estimons que la force électromotrice de chaque pile voyageuse est connue en fonction de V_{69-BI} avec un écart-type de l'ordre $0,035 \mu V$; mais il nous est plus difficile d'évaluer la précision avec laquelle elle est connue en fonction de l'"unité nationale" du laboratoire d'origine. En effet, les chocs mécaniques et surtout les chocs thermiques que subissent parfois les piles au cours de leur transport provoquent souvent des variations fortuites de leur force électromotrice très supérieures aux incertitudes d'étalonnage et aux variations éventuelles dues à une évolution naturelle.

L'examen des différences entre les valeurs déterminées par les laboratoires nationaux avant et après la comparaison au B.I.P.M. (tableau IV) permet seulement d'apprécier l'ordre de grandeur de l'erreur maximale que l'on peut commettre en attribuant aux piles voyageuses, à la date centrale de la comparaison, la moyenne arithmétique de ces valeurs.

Nous pensons donc finalement que la meilleure façon d'apprécier la précision avec laquelle sont connus les résultats du tableau VI consiste à étudier, pour chaque laboratoire, la dispersion des résultats fournis par ses différentes piles (tableau V). Une telle étude conduit à un écart-type ne dépassant qu'exceptionnellement $0,1 \mu V$.

TABLEAU II

Valeurs des groupes voyageurs, exprimées en fonction de V_{69-BI}

à	20 °C	D.A.M.W.	=	1,018 634 00 V_{69-BI}
à	20 °C	P.T.B.	=	1,018 645 02
à	20 °C	N.B.S. n° 1	=	1,018 656 82
à	30 °C	N.B.S. n° 2	=	1,018 138 98
à	20 °C	N.S.L.	=	1,018 619 33
à	30 °C	N.R.C.	=	1,018 132 67
à	20 °C	L.C.I.E.	=	1,018 633 11
à	20 °C	I.E.N.	=	1,018 611 61
à	20 °C	E.T.L.	=	1,018 627 94
à	20 °C	N.P.L. n° 1	=	1,018 634 85
à	20 °C	N.P.L. n° 2	=	1,018 600 42
à	20 °C	I.M.M.	=	1,018 639 22

TABLEAU III

Valeurs des piles étalons de chaque groupe, exprimées en fonction de V_{69-BI}

Laboratoires	N ^{os} des piles			
D.A.M.W. (à 20 °C)	D.251	=	1,018	572 81 V_{69-BI}
	D.252	=		655 11
	D.253	=		663 02
	D.254	=		643 98
	D.255	=		635 06
P.T.B. (à 20 °C)	691	=	1,018	650 55
	692	=		649 74
	693	=		647 29
	694	=		645 98
	705	=		631 53
N.B.S. n° 1 (à 20 °C)	965	=	1,018	631 08
	1158	=		660 10
	1160	=		663 37
	1161	=		664 83
	1162	=		654 72
1173	=		666 82	
N.B.S. n° 2 (à 30 °C)	1	=	1,018	139 79
	2	=		140 00
	3	=		139 33
	4	=		136 80
N.S.L. (à 20 °C)	1103	=	1,018	624 02
	1104	=		622 88
	1106	=		616 38
	1108	=		616 54
	1109	=		618 12
	1111	=		618 06
N.R.C. (à 30 °C)	1	=	1,018	127 07
	2	=		138 58
	3	=		137 18
	4	=		127 84
L.C.I.E. (à 20 °C)	7353	=	1,018	636 87
	7356	=		633 58
	7357	=		636 61
	7358	=		625 72
	7359	=		632 75
I.E.N. (à 20 °C)	1957	=	1,018	611 81
	1958	=		612 12
	1959	=		611 66
	1960	=		610 44
	1961	=		610 88
	1962	=		612 75
E.T.L. (à 20 °C)	A. 71	=	1,018	621 34 V_{69-BI}
	A. 78	=		624 22
	A. 82	=		622 87
	1047	=		631 15
	1054	=		635 02
	A.1806	=		633 06
N.P.L. n° 2 (à 20 °C)	6215	=	1,018	605 87
	3241	=		593 46
	3507	=		598 75
	3514	=		596 75
	81	=		594 61
	82	=		595 94
	5309	=		617 59
I.M.M. (à 20 °C)	5641	=	1,018	638 60
	5648	=		639 10
	5649	=		639 86
	5651	=		638 61
	5661	=		639 92

TABLEAU IV

Valeurs des piles étalons, exprimées en "unité nationale"

Pour chaque pile, cette valeur est la moyenne des valeurs attribuées par le laboratoire d'origine avant et après les mesures au B.I.P.M.

<u>D.A.M.W.</u>				
Piles N ^{os}	12 octobre 1969	23 juillet 1970	au 1 ^{er} février 1970	
D.251	1,018 569 5	1,018 570 7	1,018 570 10	V _{DAMW}
D.252	656 1	648 9	652 50	
D.253	662 7	663 4	663 05	
D.254	641 4	642 0	641 70	
D.255	632 6	632 4	632 50	
	1,018 632 46	1,018 631 48	1,018 631 97	V _{DAMW}
<u>P.T.B.</u>				
	1 ^{er} novembre 1969	du 10 au 18 juin 1970	au 1 ^{er} février 1970	
691	1,018 650 9	1,018 650 9	1,018 650 90	V _{PTB}
692	650 1	650 2	650 15	
693	647 6	647 5	647 55	
694	646 3	646 3	646 30	
705	631 2	631 8	631 50	
	1,018 645 22	1,018 645 34	1,018 645 23	V _{PTB}
<u>N.B.S. n° 1</u>				
	9 au 22 octobre 1969	6 au 20 avril 1970	au 1 ^{er} février 1970	
965	1,018 630 6	1,018 630 8	1,018 630 70	V _{NBS}
1158	660 3	659 8	660 05	
1160	662 5	662 3	662 40	
1161	664 5	664 6	664 55	
1162	653 9	654 9	654 40	
1173	666 5	667 5	667 00	
	1,018 656 55	1,018 656 82	1,018 656 68	V _{NBS}
<u>N.B.S. n° 2</u>				
	3 au 9 février 1970	25 mars-21 avril 1970	février-mars 1970	
1	1,018 139 58	1,018 139 57	1,018 139 57	V _{NBS}
2	140 05	139 87	139 96	
3	139 09	139 15	139 12	
4	136 52	136 66	136 59	
	1,018 138 81	1,018 138 81	1,018 138 81	V _{NBS}
<u>N.S.L.</u>				
	3 juin 1969	17 avril 1970	au 1 ^{er} février 1970	
1103	1,018 624 2	1,018 624 0	1,018 624 10	V _{NSL}
1104	623 3	622 2	622 75	
1106	616 7	616 1	616 40	
1108	617 0	616 1	616 55	
1109	618 4	617 9	618 15	
1111	618 4	617 7	618 05	
	1,018 613 67	1,018 619 00	1,018 619 33	V _{NSL}
<u>N.R.C.</u>				
	4 sept.-6 octobre 1969 (à 30,001)	6 avril-14 mai 1970 (à 30,001)	au 1 ^{er} février 1970 (à 30,001) (à 30 °C)	
1	1,018 126 9	1,018 126 9	1,018 126 90	1,018 126 96 V _{NRC}
2	138 2	138 6	138 40	138 46
3	137 2	136 8	137 00	137 06
4	127 7	127 8	127 75	127 81
	1,018 132 50	1,018 132 52	1,018 132 51	1,018 132 57 V _{NRC}

Au voisinage de 30 °C le coefficient de température admis pour ces piles étalons est : $\alpha_{30} = - 56,7 \mu\text{V/K}$.

TABLEAU IV (suite)

			<u>L.C.I.E.</u>		
			10 octobre 1969	15 juin 1970	au 1 ^{er} février 1970
7353	1,018	636 4	1,018	637 3	1,018 636 85 V _{LCIE}
7356		632 8		633 6	633 20
7357		634 8		634 9	634 85
7358		627 9		626 2	627 05
7359		632 4		632 4	632 40
<hr/>			<hr/>		
	1,018	632 86	1,018	632 88	1,018 632 87 V _{LCIE}

			<u>I.E.N.</u>		
			14 novembre 1969	4-11 mai 1970	au 1 ^{er} février 1970
1957	1,018	613 02	1,018	612 49	1,018 612 76 V _{IEN}
1958		611 99		611 92	611 96
1959		611 37		611 45	611 41
1960		610 63		610 73	610 68
1961		611 20		610 97	611 08
1962		612 18		612 87	612 52
<hr/>			<hr/>		
	1,018	611 73	1,018	611 74	1,018 611 73 ₅ V _{IEN}

			<u>E.T.L.</u>		
			7 octobre 1969	4 mai 1970	au 1 ^{er} février 1970
A.71	1,018	620 85	1,018	621 11	1,018 620 98 V _{ETL}
A.78		623 69		624 09	623 89
A.82		622 30		622 38	622 34
1047		630 22		630 44	630 33
1054		633 88		635 02	634 45
<hr/>			<hr/>		
	1,018	626 19	1,018	626 61	1,018 626 40 V _{ETL}

			<u>N.P.L. n° 2</u>		
			janvier- février ou avril 1970	23 septembre 1970	juin 1970
6215	1,018	605 1	1,018	605 4	1,018 605 25 V _{NPL}
3241		592 6		592 8	592 70
3507		598 2		598 1	598 15
3514		596 2		596 3	596 25
S1		593 5		593 8	593 65
S2		595 5		595 0	595 25
5309		616 8		616 8	616 80
<hr/>			<hr/>		
	1,018	599 70	1,018	599 74	1,018 599 72 V _{NPL}

			<u>I.M.M.</u>		
			septembre 1969	juillet 1970	au 1 ^{er} février 1970
5641	1,018	637 0	1,018	637 9	1,018 637 45 V _{IMM}
5648		637 0		637 3	637 15
5649		636 0		638 0	637 00
5651		634 8		636 6	635 70
5661		637 3		638 3	637 80
<hr/>			<hr/>		
	1,018	636 42	1,018	637 62	1,018 637 02 V _{IMM}

TABLEAU V

Valeur de chaque "unité nationale" en fonction de V_{69-BI}

Les piles qui ne figurent pas dans ce tableau ont été éliminées à la demande du laboratoire d'origine, parce que leur valeur "retour" montrait qu'elles avaient subi des dommages en cours de transport.

<u>D.A.M.W.</u>										
D.251	1,018	570	10	V_{DAMW}	=	1,018	572	81	V_{69-BI}	d'où $V_{DAMW} = V_{69-BI} + 2,66 \mu V$
D.252		652	50		=		655	11		= $+2,56$
D.254		641	70		=		643	98		= $+2,24$
D.255		632	50		=		635	06		= $+2,51$
	1,018	624	20	V_{DAMW}	=	1,018	626	74	V_{69-BI}	d'où $V_{DAMW} = V_{69-BI} + 2,49 \mu V$
<u>P.T.B.</u>										
691	1,018	650	90	V_{PTB}	=	1,018	650	55	V_{69-BI}	d'où $V_{PTB} = V_{69-BI} - 0,34 \mu V$
692		650	15		=		649	74		= $-0,40$
693		647	55		=		647	29		= $-0,26$
694		646	30		=		645	98		= $-0,31$
705		631	50		=		631	53		= $+0,03$
	1,018	645	28	V_{PTB}	=	1,018	645	02	V_{69-BI}	d'où $V_{PTB} = V_{69-BI} - 0,26 \mu V$
<u>N.B.S. n° 1</u>										
965	1,018	630	70	V_{NBS}	=	1,018	631	08	V_{69-BI}	d'où $V_{NBS} = V_{69-BI} + 0,37 \mu V$
1158		660	05		=		660	10		= $+0,05$
1160		663	40		=		663	37		= $-0,03$
1161		664	55		=		664	83		= $+0,27$
1162		654	40		=		654	72		= $+0,31$
1173		667	00		=		666	82		= $-0,18$
	1,018	656	68	V_{NBS}	=	1,018	656	82	V_{69-BI}	d'où $V_{NBS} = V_{69-BI} + 0,13 \mu V$
<u>N.B.S. n° 2</u>										
1	1,018	139	57	V_{NBS}	=	1,018	139	79	V_{69-BI}	d'où $V_{NBS} = V_{69-BI} + 0,22 \mu V$
2		139	96		=		140	00		= $+0,04$
3		139	12		=		139	33		= $+0,21$
4		136	59		=		136	80		= $+0,21$
	1,018	138	81	V_{NBS}	=	1,018	138	98	V_{69-BI}	d'où $V_{NBS} = V_{69-BI} + 0,17 \mu V$
<u>N.S.L.</u>										
1103	1,018	624	10	V_{NSL}	=	1,018	624	02	V_{69-BI}	d'où $V_{NSL} = V_{69-BI} - 0,08 \mu V$
1104		622	75		=		622	88		= $+0,13$
1106		616	40		=		616	38		= $-0,02$
1108		616	55		=		616	54		= $-0,01$
1109		618	15		=		618	12		= $-0,03$
1111		618	05		=		618	06		= $+0,01$
	1,018	619	33	V_{NSL}	=	1,018	619	33	V_{69-BI}	d'où $V_{NSL} = V_{69-BI} 0,00 \mu V$
<u>N.R.C.</u>										
1	1,018	126	96	V_{NRC}	=	1,018	127	07	V_{69-BI}	d'où $V_{NRC} = V_{69-BI} + 0,11 \mu V$
2		138	46		=		138	58		= $+0,12$
3		137	06		=		137	18		= $+0,12$
4		127	81		=		127	84		= $+0,03$
	1,018	132	57	V_{NRC}	=	1,018	132	67	V_{69-BI}	d'où $V_{NRC} = V_{69-BI} + 0,10 \mu V$

TABLEAU V (suite)

L.C.I.E.

7353	1,018	636	85	V_{LCIE}	=	1,018	636	87	V_{69-BI}	d'où	$V_{LCIE}=V_{69-BI}+0,02$	μV
7356		633	20	=		633	68	=	=	=	+0,37	
7357		634	85	=		636	61	=	=	=	+1,73	
7358		627	05	=		625	72	=	=	=	-1,31	
7359		632	40	=		632	75	=	=	=	+0,34	

$$1,018 \ 632 \ 87 \ V_{LCIE} = 1,018 \ 633 \ 11 \ V_{69-BI} \ \text{d'où} \ V_{LCIE}=V_{69-BI}+0,23 \ \mu V$$

I.E.N.

1958	1,018	611	96	V_{IEN}	=	1,018	612	12	V_{69-BI}	d'où	$V_{IEN}=V_{69-BI}+0,16$	μV
1959		611	41	=		611	66	=	=	=	+0,25	
1960		610	68	=		610	44	=	=	=	-0,24	
1961		611	08	=		610	88	=	=	=	-0,20	
1962		612	52	=		612	75	=	=	=	+0,23	

$$1,018 \ 611 \ 53 \ V_{IEN} = 1,018 \ 611 \ 57 \ V_{69-BI} \ \text{d'où} \ V_{IEN}=V_{69-BI}+0,04 \ \mu V$$

E.T.L.

A.71	1,018	620	98	V_{ETL}	=	1,018	621	34	V_{69-BI}	d'où	$V_{ETL}=V_{69-BI}+0,35$	μV
A.78		623	89	=		624	22	=	=	=	+0,32	
A.82		622	34	=		622	87	=	=	=	+0,52	
1047		630	33	=		631	15	=	=	=	+0,81	
1054		634	45	=		635	02	=	=	=	+0,56	

$$1,018 \ 626 \ 40 \ V_{ETL} = 1,018 \ 626 \ 92 \ V_{69-BI} \ \text{d'où} \ V_{ETL}=V_{69-BI}+0,51 \ \mu V$$

N.P.L. n° 2

6215	1,018	605	25	V_{NPL}	=	1,018	605	87	V_{69-BI}	d'où	$V_{NPL}=V_{69-BI}+0,61$	μV
3241		592	70	=		593	46	=	=	=	+0,75	
3507		598	15	=		598	75	=	=	=	+0,59	
3514		596	25	=		596	75	=	=	=	+0,49	
S1		593	65	=		594	61	=	=	=	+0,94	
S2		595	25	=		595	94	=	=	=	+0,68	
5309		616	80	=		617	59	=	=	=	+0,78	

$$1,018 \ 599 \ 72 \ V_{NPL} = 1,018 \ 600 \ 42 \ V_{69-BI} \ \text{d'où} \ V_{NPL}=V_{69-BI}+0,69^* \ \mu V$$

* Le rattachement effectué avec le groupe n° 1 conduisait à la relation $V_{NPL} = V_{69-BI} + 0,73 \ \mu V$. L'accord entre les deux résultats est donc très satisfaisant.

I.M.M.

5641	1,018	637	45	V_{IMM}	=	1,018	638	60	V_{69-BI}	d'où	$V_{IMM}=V_{69-BI}+1,13$	μV
5648		637	15	=		639	10	=	=	=	+1,91	
5649		637	00	=		639	86	=	=	=	+2,81	
5651		635	70	=		638	61	=	=	=	+2,86	
5661		637	80	=		639	92	=	=	=	+2,08	

$$1,018 \ 637 \ 02 \ V_{IMM} = 1,018 \ 639 \ 22 \ V_{69-BI} \ \text{d'où} \ V_{IMM}=V_{69-BI}+2,16 \ \mu V$$

TABLEAU VI

Résultats de la 12^e comparaison
(février 1970)

Allemagne	{	(D.A.M.W.)	V _{DAMW}	= V _{69-BI}	+ 2,49 μV
		(P.T.B.)	V _{PTB-69}	=	- 0,26
Australie	(N.S.L.)	V _{NSL-69}	=		0,00
Canada	(N.R.C.)	V _{NRC-69}	=		+ 0,10
Etats-Unis d'Amérique	(N.B.S.)	V _{NBS-69}	=		+ 0,17
France	(L.C.I.E.)	V _{LCIE-69}	=		+ 0,23
Italie	(I.E.N.)	V _{IEN-69}	=		+ 0,04
Japon	(E.T.L.)	V _{ETL-69}	=		+ 0,51
Royaume-Uni	(N.P.L.)	V _{NPL-69}	=		+ 0,69
U.R.S.S.	(I.M.M.)	V _{IMM-70}	=		+ 2,16

CONCLUSION

On constate d'abord qu'à la suite des ajustements effectués depuis le 1^{er} janvier 1969 par la plupart des laboratoires nationaux et le B.I.P.M., les "unités" de force électromotrice coïncident maintenant de façon satisfaisante.

On constate ensuite que pour les laboratoires qui ont utilisé comme étalons de transfert des piles enfermées dans une enceinte thermorégulée :

1° La différence entre les valeurs de chaque pile mesurées avant leur envoi au B.I.P.M. et après leur retour du B.I.P.M. est toujours faible (écart maximal : 0,4 μV).

2° La dispersion des résultats fournis par les différentes piles ne dépasse pas 0,18 μV.

Il paraît donc souhaitable de généraliser l'emploi de telles enceintes lors des prochaines comparaisons internationales ; elles permettraient probablement d'améliorer la précision de ces comparaisons et sans doute de réduire leur durée (comme le prouve le succès de la comparaison effectuée en quelques semaines seulement avec le groupe N° 2 du N.B.S.)

ANNEXE E 4

État d'avancement de la comparaison internationale circulaire des étalons de capacité en silice de 10 pF

Par G. LECLERC

Bureau International des Poids et Mesures

(Document CCE/72-17)

Les premiers résultats de cette comparaison organisée conformément à la Recommandation E 4 du Comité Consultatif d'Electricité (1963) ont été publiés en 1968 (*C.C.E.*, 12^e session, 1968, Annexe E 4, p. E 47). L'objet du présent rapport est de faire connaître les résultats obtenus depuis cette époque.

Rappelons que la comparaison a pour buts principaux 1° de mesurer les écarts entre les représentations nationales de l'unité de capacité, 2° d'évaluer la précision réelle avec laquelle les laboratoires déterminent l'unité de capacité en valeur absolue.

Les participants ont finalement été répartis en cinq groupes (au lieu des quatre prévus initialement) et les trois étalons voyageurs construits par le N.B.S. ont effectué les circuits de comparaison suivants :

Circuit n° 1, commencé en septembre 1966, terminé en décembre 1966 :

NBS → NRC → NPL → NBS

Circuit n° 2, commencé en janvier 1967, terminé en janvier 1968 :

NBS → NSL → ETL → NBS

TABLEAU I

Résultats des cycles Nos 3, 4 et 5 (partiellement) de la comparaison internationale circulaire
des étalons de capacité en silice de 10 pF

$$C = 10 (1 + \Delta \times 10^{-6}) \text{ pF}$$

Valeur de Δ , à 25 °C

Etalon N°	N.B.S.	L.C.I.E. (1)	N.B.S.	I.M.M.	D.A.M.W. (2)	N.B.S.	I.E.N. (3)	P.T.B.
	fév. 68 (100 V, 1592 Hz)	avril 69 (10 V, 1592 Hz)	juin 69 (100 V, 1592 Hz)	jan.70-fév.71 (100 V, 1000 Hz)	juin-nov.71 (100 V, 1592 Hz)	avril 72 (100 V, 1592 Hz)	juin-juil.72	sept.-oct. 72 (75 V, 1592 Hz)
156775(108)	- 16,37	- 11,2	- 16,34	- 15,89	- 14,10	- 16,20	- 16,37	- 14,90
159852(119)	- 3,36	+ 1,6	- 3,26	- 2,84	- 1,36	- 3,13	- 3,32	- 1,85
159853(120)	- 3,08	+ 1,9	- 2,95	- 2,31	- 0,78	- 2,64	- 2,77 ₅	- 1,35
Moyenne	- 7,60	- 2,57 ± 4	- 7,52	- 7,01	- 5,41 ± 3	- 7,32	- 7,49	- 6,03 ± 2

(1) Au LCIE les mesures ont été effectuées à 24,87 °C et les résultats ramenés à 25 °C en admettant le coefficient de température moyen suivant : $\alpha_{25} = + 10 \times 10^{-6}/K$.

(2) Le DAMW a déterminé la valeur des étalons de capacité à 20 °C ; les valeurs à 25 °C données dans ce tableau ont été calculées en tenant compte des écarts mesurés entre 20 et 25 °C par l'IEN en juin-juillet 1972 (respectivement + 52,28 x 10⁻⁶, + 52,83 x 10⁻⁶, + 50,76 x 10⁻⁶ pour les condensateurs nos 108, 119 et 120); on utilisait précédemment les corrections indiquées par le NBS, à savoir + 52,03 x 10⁻⁶, + 53,74 x 10⁻⁶ et + 50,71 x 10⁻⁶.

(3) L'IEN ne disposant pas encore d'un condensateur calculable, conserve l'unité de capacité au moyen d'un groupe d'étalons dont les valeurs ont été déterminées par comparaison avec un étalon du NBS en 1966.

TABLEAU II

Résultats des déterminations effectuées au N.B.S. sur les trois condensateurs voyageurs

$$C = 10 (1 + \Delta \times 10^{-6}) \text{ pF}$$

Valeurs de Δ , à 25 °C

	N° 108	N° 119	N° 120
1 ^{er} septembre 1966	- 16,54	- 3,65	- 3,32
1 ^{er} janvier 1967	- 16,49	- 3,50	- 3,30
1 ^{er} février 1968	- 16,37	- 3,36	- 3,08
1 ^{er} juin 1969	- 16,34	- 3,26	- 2,95
1 ^{er} avril 1972	- 16,20	- 3,13	- 2,64

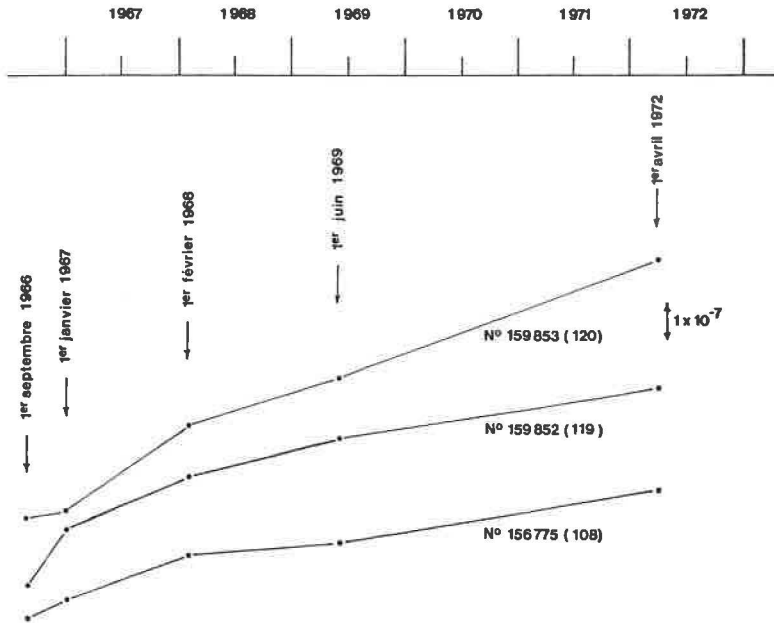


Fig. 1.

Circuit n° 3, commencé en février 1968, terminé en mai 1969 :

NBS + NPRL + LCIE + NBS

Circuit n° 4, commencé en août 1969, terminé en janvier 1971 :

NBS + IMM + DAMW + NBS

Circuit n° 5, commencé en mars 1972 :

NBS + IEN + PTB + LCIE + NBS

Les condensateurs voyageurs ont été renvoyés par le L.C.I.E. au N.B.S. en mars 1973 ; la comparaison est donc terminée, mais les résultats obtenus par ces deux derniers laboratoires ne nous ont pas encore été communiqués.

Les résultats des circuits N^{OS} 1 et 2 ont été publiés en 1968. Ceux des circuits N^{OS} 3 et 4 et partiellement ceux du circuit N° 5 sont donnés dans le tableau I.

Un accident (incendie) ayant détruit le condensateur calculable en cours de réalisation au N.P.R.L. (Pretoria), ce laboratoire n'a pu effectuer que des mesures relatives entre les étalons voyageurs. Pour cette raison ses résultats ne figurent pas dans le tableau I.

Bien que l'emploi généralisé de condensateurs calculables du type Thompson-Lampard comme étalons primaires ait déjà permis de réduire beaucoup les écarts entre les réalisations nationales de l'unité de capacité, on constate parfois qu'il existe encore entre elles des différences importantes. Ces différences et les larges incertitudes de certains résultats prouvent que la mise au point d'un condensateur calculable est une entreprise laborieuse que tous les laboratoires n'avaient pas encore terminée lorsqu'ils ont eu à mesurer les condensateurs voyageurs.

Le comportement de ces condensateurs voyageurs a été par contre très satisfaisant (Tableau II et figure 1). Leur stabilité est équivalente à celle des meilleurs étalons de résistance. Ils permettent à coup sûr de comparer entre elles les réalisations nationales de l'unité de capacité à 1×10^{-7} près.

Une prolongation de la comparaison serait donc justifiée ; elle permettrait d'apprécier les progrès réalisés dans les laboratoires nationaux depuis le dernier passage des étalons voyageurs.

(Octobre 1972, révisé en juillet 1973)

ANNEXE E 5

Comportement d'une enceinte thermorégulée en fonction de la température ambiante

Par G. LECLERC

Bureau International des Poids et Mesures

(Document CCE/72-16)

L'emploi de plus en plus fréquent, comme étalons de transfert "du volt", de piles conservées dans des enceintes maintenues à température constante, leur utilisation probable lors de la prochaine comparaison triennale des étalons nationaux de force électromotrice et l'amélioration de la précision du rattachement des "unités" qu'on en espère (1×10^{-7}), nous ont incité à contrôler le comportement d'une telle enceinte et à vérifier la stabilité des piles qu'elle contient lorsqu'on fait varier la température de l'air ambiant dans lequel se trouve placée cette enceinte.

L'enceinte que nous avons étudiée possède un double système de régulation (extérieur et intérieur) et fonctionne à une température nominale de 30 °C. Un dispositif thermométrique étalonné par le constructeur, constitué d'une thermistance montée dans l'un des bras d'un pont de Wheatstone qu'on équilibre, permet de connaître la température exacte des piles au millième de kelvin près.

Cette enceinte a été placée à l'intérieur d'une autre enceinte construite au B.I.P.M. et dans laquelle on a fait varier la température entre 20 et 27 °C environ.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau I. Chacune des valeurs du tableau est la moyenne des résultats des dix comparaisons aux dix groupes de référence du B.I.P.M.,

TABLEAU I

Force électromotrice à 30,014 °C de piles maintenues dans une enceinte thermorégulée transportable,
en fonction de la température ambiante

(Excès en microvolts sur 1,018 000 V_{69-BI})

Mesure N°	Date	Température ambiante	Température des piles	F.é.m. des piles			
				N° 1	N° 2	N° 3	N° 4
1	6-10 mars 1972	20,0 °C	30,015 °C	154,1	153,0	153,1	153,4
2	13-17 mars	27,4	30,002	154,6	153,2	153,5	153,7
3	19-24 mars	24,3	30,007	154,5	153,2	153,5	153,7
4	27-30 mars	19,8	30,012	154,4	153,0	153,4	153,6
5	6-13 avril	19,9	30,014	154,3	152,7	153,3	153,5
6	17-21 avril	25,0	30,004	154,5	152,8	153,5	153,8
7	24-28 avril	24,8 ₅	30,006	154,6	152,8	153,5	153,8
8	2- 8 mai	21,1	30,011	154,6	152,7	153,5	153,8
9	15-27 mai	20,0	30,013	154,4	152,7	153,3	153,6
10	30 mai - 4 juin	20,0	30,015	154,4	152,8	153,3	153,5
Moyenne des mesures NOS 1, 4, 5, 8, 9, 10		20,1	30,014	154,4	152,8	153,3	153,6
Moyenne des mesures NOS 2, 3, 6, 7		25,4	30,005	154,6	153,0	153,5	153,8
Différences			+ 0,009 °C	- 0,2	- 0,2	- 0,2	- 0,2 μV

effectuées chaque semaine. Les forces électromotrices des piles étudiées ont été ramenées à la température de $30,014\text{ }^{\circ}\text{C}$ en admettant comme coefficient de température moyen au voisinage de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ la valeur $\alpha_{30} = -56,7\text{ }\mu\text{V/K}$.

On constate d'abord que la température à l'intérieur de l'enceinte (température que l'on admet être celle des piles) varie avec la température du milieu ambiant qui entoure l'enceinte. On constate ensuite, ce qui est plus grave, que les forces électromotrices attribuées aux piles semblent varier aussi avec cette température ambiante. Bien que les variations observées soient faibles, à peine supérieures à la précision des mesures, elles sont systématiques.

Il serait imprudent de tirer une conclusion formelle d'une seule expérience faite sur un seul instrument. Ce premier résultat doit cependant éveiller l'attention des utilisateurs d'enceintes et il nous semble indispensable d'étudier plus complètement leur comportement avant d'affirmer qu'elles permettent de transférer "le volt" d'un laboratoire à un autre avec la précision de 1×10^{-7} .

(Septembre 1972)

ANNEXE E 6

État d'avancement des travaux sur le volt absolu au N.B.S.

Par F. K. HARRIS

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

(Traduction du Document CCE/72-7)

L'électromètre absolu de Brooks, Silsbee et Defandorf, achevé dans les années 30 était une extension de l'électromètre à plateaux de Kelvin. En fait, Lord Kelvin avait perfectionné l'ancien électromètre à plateaux du Professeur Snow-Harris en y ajoutant un anneau de garde, le transformant ainsi en un système à trois bornes. Comme le premier électromètre du N.B.S. devait fonctionner jusqu'à 250 kV, l'écartement des plateaux parallèles était trop grand pour qu'il suffise d'installer un simple anneau de garde. Une série d'anneaux de garde mis à des potentiels échelonnés fut ajoutée entre les plateaux parallèles, le but étant de garder le contrôle du champ de façon à pouvoir calculer la force sur le plateau à partir de l'aire et de l'écartement.

Le but de l'expérience n'était pas la réalisation exacte de l'unité de f.é.m. à partir des unités mécaniques ; elle fut plutôt entreprise comme un moyen de vérifier raisonnablement l'extension de l'échelle de tension jusqu'à 150 kV, qui avait déjà été faite par un autre moyen dans notre laboratoire des hautes tensions. Dans l'étalonnage de transformateurs de mesure, nous avons utilisé un diviseur de tension à résistances avec des écrans intermédiaires pour les déterminations de rapports de transformation. Le dispositif atteignait une limite pratique à environ 30 kV ; le passage à des tensions supérieures était effectué en extrapolant l'étalonnage d'un transformateur de

référence par des branchements en parallèle et en série. Si maintenant on mesure directement la haute tension avec l'électromètre et si l'on détermine la basse tension en même temps par une technique électrodynamique de transfert courant alternatif - courant continu et qu'on la rapporte à la f.é.m. d'une pile étalon, on a une évaluation indépendante du rapport du transformateur de référence. L'accord sur le rapport résultant de l'expérience était d'environ 0,02 % et nous sommes passés à l'extension de notre domaine de mesures de tension jusqu'à 250 kV en utilisant la technique d'extrapolation par branchements en parallèle et en série. A l'époque, on avait prévu de vérifier notre méthode par une expérience à l'électromètre au niveau de 250 kV. Cela ne fut plus nécessaire quand, en utilisant des diviseurs de tension capacitifs, l'échelle de rapport fut étendue directement jusqu'à 350 kV. Une comparaison internationale entre le N.B.S. et le N.R.C., chaque laboratoire utilisant des techniques de mesure radicalement différentes, donna un accord à mieux que 20×10^{-6} , ce qui représentait une amélioration d'un ordre de grandeur sur notre incertitude antérieure.

Une limite fondamentale des résultats de l'électromètre à plateaux provient du fait que le plateau mobile et son anneau de garde ne sont pas rigoureusement dans le même plan. La distorsion du champ au bord utile soit de l'électrode active soit de l'électrode de garde, limite les possibilités d'évaluation de l'aire effective du plateau mobile. Cela est vrai même si l'on suppose que les deux électrodes active et de garde sont des plans parfaitement parallèles. Dans la loi de force applicable ($2 mg = V^2 \partial C / \partial x$), $\partial C / \partial x$ devient non linéaire si les plans parallèles ne coïncident pas et une incertitude de 0,01 % apparaît comme une limite pratique dans l'utilisation de l'électromètre à plateaux de Kelvin.

En dehors de l'intérêt d'une répétition, essayer sérieusement de faire une détermination absolue valable du volt présente certains avantages évidents sur l'expérience classique de détermination de l'ampère. L'utilisation d'un électromètre ne produit pas d'échauffement avec les incertitudes dues aux changements de dimensions qui en résultent et avec les mouvements de l'air qui perturbent la mesure de la force.

Dans son essence, si l'on doit considérer une expérience sur le volt comme un moyen de vérifier ou d'améliorer notre réalisation des unités, cette expérience doit laisser espérer des incertitudes inférieures à quelques millièmes ; une

condition préalable est que la loi de force dépende aussi peu que possible de la position des éléments du système, compte tenu bien entendu des restrictions imposées par la symétrie. Ce critère exclut automatiquement la disposition plateaux parallèles avec anneau de garde de Kelvin. Deux géométries méritent une attention particulière si l'on veut une relation linéaire entre la capacité et le déplacement de l'électrode active : 1° une disposition cylindrique coaxiale, avec déplacement de l'électrode mobile le long de l'axe de symétrie ; 2° un arrangement des plans parallèles alternés avec rotation de l'électrode mobile. Ce dernier système demande la détermination d'un couple de torsion plutôt que d'une force, ce qui présente des difficultés accrues déjà rencontrées dans le dynamomètre de Pellat utilisé dans l'une de nos déterminations de l'ampère (la longueur des bras de la balance et leur déformation sous la charge deviennent critiques) ; cela impose des restrictions à la conception de la balance. Par ailleurs, la disposition cylindrique coaxiale proposée par Cutkosky se prête davantage à la détermination d'une force qu'à la détermination d'un couple de torsion et, si l'on emploie une technique de substitution directe, elle nous libère des contraintes imposées sur la conception de la balance par le fait qu'il s'agit d'un couple de torsion.

La substitution d'une force mécanique à une force électrique dans l'axe de symétrie de l'électromètre permet l'adaptation d'une balance à deux couteaux, qui a été mise au point et essayée par la section des masses du N.B.S. pour la comparaison de Kilogrammes. On a obtenu une incertitude de 2 à 3×10^{-9} (2 à 3 μg sur un kilogramme). D'après les conseils donnés, nous avons augmenté de 50 % l'écartement entre les deux couteaux (de 50 à 75 mm), permettant ainsi d'utiliser un fléau plus massif de section plus grande afin de réduire les éventuels gradients de température le long du fléau. Dans la balance pour la comparaison des Kilogrammes, un dispositif spécial d'arrêt maintient le contact entre les couteaux et les plans pendant la substitution des masses. Notre balance utilise le même dispositif d'arrêt, tant que le changement maximal de la charge au cours d'une substitution est de 5 g sur 5 kg (soit un changement relatif de 1×10^{-3}). Cela devrait entraîner moins de perturbation au niveau des contacts couteau-plan et, nous l'espérons, réduire l'incertitude de la pesée.

Dans l'électromètre, la relation capacité/déplacement sera déterminée par mesure directe en maintenant l'électrode mobile dans une position fixe et en déplaçant verticalement le système d'électrode à haute tension. Un interféromètre à laser H-P sera monté dans l'axe de symétrie afin de mesurer le déplacement. La capacité correspondante sera mesurée avec le nouveau pont General Radio, étalonné avec des étalons voyageurs mesurés par comparaison avec le condensateur calculable. L'ensemble de l'électromètre sera enfermé et fonctionnera dans une atmosphère d'azote sec sous une pression connue, et $\partial C/\partial x$ sera déterminé dans les conditions réelles. Les dimensions des électrodes ont été choisies de façon à réduire les variations des effets d'extrémité en fonction de la position de l'équipage mobile ; des mesures préliminaires à l'air libre n'ont montré aucun écart à la linéarité de la relation entre la capacité et le déplacement sur les 10 cm de course utilisable.

Nous pensons faire des déterminations de force à toutes les valeurs entières comprises entre 1 et 5 g, puisqu'on peut ainsi faire des mesures de force meilleures que si l'on emploie des masses de valeur quelconque. Les tensions de fonctionnement correspondantes s'échelonnent entre 4 et 9 kV, et nous espérons régler la tension pour obtenir l'équilibre. On a construit une source de courant continu qui fonctionne dans ce domaine avec un niveau de bruit de 2×10^{-7} et une dérive inférieure à 1×10^{-7} par heure. Les mesures de tension seront faites par comparaison avec un groupe de neuf piles étalons montées en série, à l'aide d'un diviseur du type mis au point par Dunfee et Dziuba pour l'étalonnage des diviseurs de tension. Il comprend des résistances de 1 k Ω à 1 M Ω , telles que tous les rapports utilisés peuvent être déterminés par des comparaisons dans le rapport 1 à partir d'une des résistances de 1 k Ω . Un des dix éléments de 1 k Ω sera shunté pendant la détermination de la tension par un diviseur de 100 k Ω à sept décades pour assurer l'équilibre exact avec la série des piles étalons. On utilisera diverses combinaisons de résistances, selon les différentes tensions de fonctionnement, et dans tous les cas on peut utiliser la série de neuf piles comme tension de référence. La température du diviseur sera maintenue constante à 0,1 °C près, à la puissance maximale, par le bain d'huile dans lequel il est plongé, et les coefficients de température des résistances sont choisis de telle façon que les variations du rapport résultant de leur

échauffement propre soient négligeables.

Nous avons l'intention d'utiliser comme tension de référence d'usage des piles non saturées dans une enceinte à air, et d'avoir un système d'écrans de garde intermédiaires pour les neuf piles en série. Une référence supplémentaire sera donnée par deux groupes de piles saturées dans un bain d'huile, ces groupes pouvant être comparés de façon régulière et étalonnés d'après un groupe voyageur de piles étalons du laboratoire dans le cadre du programme de "conservation du volt".

On a également mis au point une source de courant alternatif avec un faible bruit et une faible dérive. Le bruit est inférieur à 1×10^{-6} et la dérive est de l'ordre de $0,1 \times 10^{-6}$ par heure. Le taux d'harmoniques est d'environ 0,01 % essentiellement de 3^e harmonique. On n'a pas encore fait l'étalonnage du rapport du transformateur abaisseur (4-9 kV/9 V), mais cela sera entrepris dès que les modifications de la source seront achevées. On envisage d'utiliser un élément de transfert thermoélectrique à jonctions multiples pour passer du courant alternatif au courant continu et pour cela également la série de neuf piles servira de référence d'usage.

Il y a peu de temps, la balance de l'électromètre a été montée avec une charge qui remplaçait l'électrode suspendue en laiton utilisée dans l'étude préliminaire de $\partial C/\partial x$. Il s'est avéré qu'avec cette charge la résolution de la balance ne pouvait satisfaire nos exigences. Toutefois, la résolution de la balance est inversement proportionnelle à la charge, et on a maintenant fabriqué une électrode en alliage d'aluminium pour réduire la charge d'un facteur 3. Au cours des essais préliminaires de pesée, on a pu constater que la réponse de la balance était suffisamment stable pour justifier une résolution optique plus élevée, et on a conçu un nouveau système optique pour en tirer profit. On est en train de remonter actuellement l'électromètre, avec les modifications indiquées, et l'on commencera par essayer à nouveau le système de pesée.

(15 août 1972)

ANNEXE E 7

Étalons calculés de capacité électrique

Par N. ELNÉKAVÉ

Laboratoire Central des Industries Électriques (France)

(Document CCE/72-22)

I. GÉNÉRALISATION DE LA CONFIGURATION CYLINDRIQUE DE LAMPARD À THOMPSON [1]

Un nombre quelconque d'électrodes distinctes peuvent être délimitées sur une surface cylindrique par des génératrices de cette surface. L'association de ces électrodes en ensembles complémentaires vérifiant le théorème de Lampard et van der Pauw [2] est alors possible et conduit à la conception d'étalons variés [3]. En particulier, une structure à cinq électrodes à symétrie circulaire (fig. 1) permet de définir cinq ensembles complémentaires constitués chacun par des capacités dans le rapport 2 à 1. Sur la figure 1 ces capacités sont, par exemple, $C_0 = C_{25}$ $2C_0 = C_{13} + C_{14}$. L'application du théorème général conduit à la capacité linéique (unités SI) :

$$(1) \quad \frac{C_0}{l} = \frac{10^7}{4\pi^2 c^2} \ln \frac{2}{\sqrt{5}-1},$$

c étant la vitesse de la lumière
et l la longueur d'électrode comptée parallèlement aux génératrices.

Un étalon comprenant cinq électrodes cylindriques a été réalisé au L.C.I.E. et sera bientôt en état de fonctionner sous vide (fig. 3).

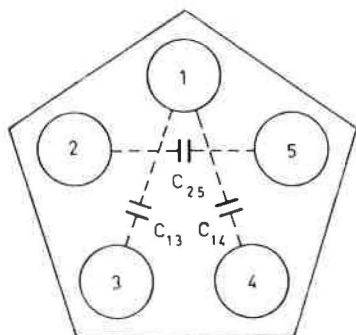


Fig. 1.

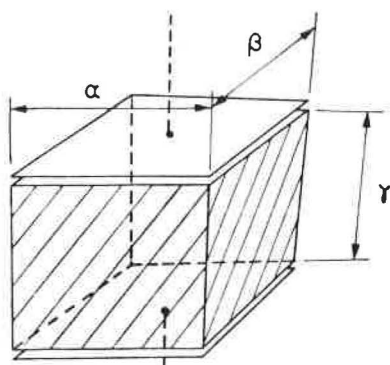


Fig. 2.

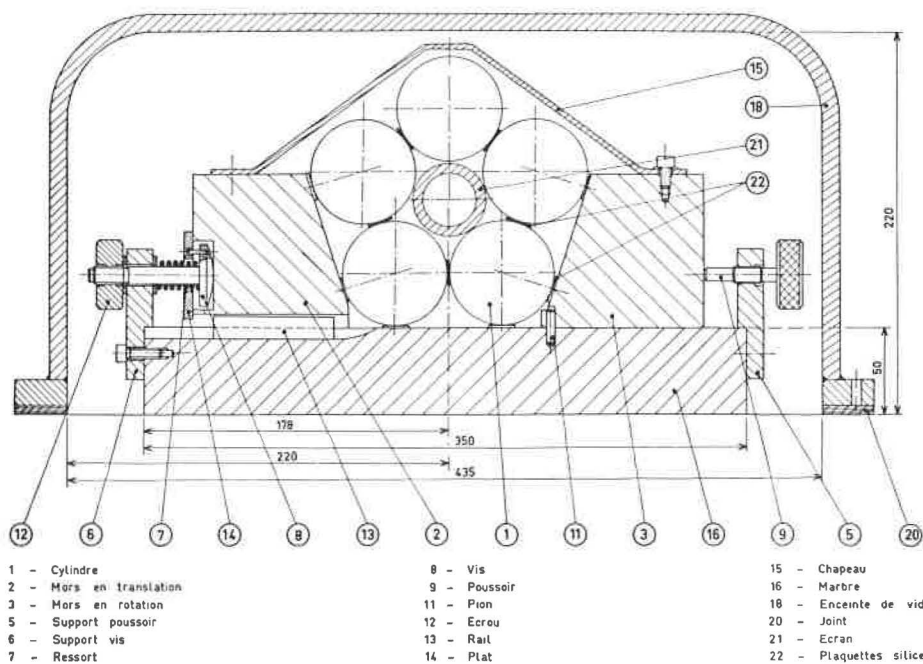


Fig. 3. — Condensateur à cinq électrodes cylindriques (cotes en millimètres).

L'avantage de la structure à cinq électrodes est de permettre une vérification de la réalisation géométrique de l'étalon de capacité : les cinq ensembles distincts ne conduisent en effet aux mêmes valeurs de capacité que lorsque les conditions d'application du théorème général sont bien remplies, en particulier en ce qui concerne le parallélisme des électrodes.

II. CONDENSATEUR CUBIQUE

Parmi toutes les surfaces fermées creuses pouvant conduire à des étalons calculables de capacité [3] celle du parallélépipède rectangle (fig. 2) est particulièrement séduisante : la réalisation des plans et leur assemblage orthogonal peuvent être effectués avec une précision élevée grâce à des procédés optiques classiques.

La capacité de deux faces opposées d'un parallélépipède est, pour la région intérieure, donnée par l'une des deux formules équivalentes

$$(2) \quad C = 10^7 \left(\frac{2}{\pi}\right)^4 \frac{\alpha\beta}{c^2} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sqrt{\left(\frac{2l+1}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{2k+1}{\beta}\right)^2}}{(2l+1)^2 (2k+1)^2 \operatorname{sh} \pi\gamma \sqrt{\left(\frac{2l+1}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{2k+1}{\beta}\right)^2}}$$

$$(3) \quad C = \frac{10^7}{4\pi c^2} \frac{\alpha\beta}{\gamma} \left\{ 1 - \frac{128}{\pi^4} \frac{\gamma^4}{\alpha^2\beta^2} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(L^2 + K^2)(J_1 + J_2)}{(L^2 + K^2 + J_1^2)(L^2 + K^2 + J_2^2)} \right\}$$

α, β, γ = arêtes du parallélépipède,

c = vitesse de la lumière,

C = capacité entre les faces d'aire $\alpha\beta$, distantes de γ .

$$L = (2l + 1) \frac{\gamma}{\alpha} ; \quad K = (2k + 1) \frac{\gamma}{\beta}$$

$$J_1 = 2j + 1 ; \quad J_2 = 2j + 2.$$

La capacité des faces opposées d'un cube d'arête a s'exprime ainsi par la formule

$$(4) \quad C = 5,476 \, 431 \, 859 \times 10^6 \cdot \frac{a}{c^2}.$$

En adoptant pour c la valeur $2,997 \, 925 \times 10^8$ m/s, l'arête a du cube de capacité 0,1 pF a pour valeur :

$$(5) \quad a = 0,164 \, 113 \, 323 \text{ m.}$$

Un étalon cubique ayant cette valeur de capacité a été d'abord étudié sous forme de maquette (précision dimensionnelle 0,02 mm). Les résultats des mesures ont montré que la moyenne des trois capacités obtenues en associant successivement les faces opposées du cube deux à deux était égale à 3×10^{-5} près à la capacité calculée à partir de l'arête moyenne. Cette maquette a permis de constater l'effet négligeable des entrefers d'isolement, d'une inclinaison légère des faces du cube par rapport à leur position idéale, et d'irrégularités (piqûres) superficielles relativement importantes.

Les conclusions de cette première étude nous ont conduits à réaliser un cube formé de plans d'invar supérieur poli optiquement (0,05 μm) et dont le montage orthogonal peut être assuré à 2" d'arc près. Un tel étalon devrait permettre d'établir l'unité de capacité avec une précision au moins égale à celle de l'étalon cylindrique. La comparaison des trois coefficients de capacité obtenus présente - comme dans le cas des cinq ensembles de l'étalon cylindrique précédent - l'avantage de renseigner sur l'ordre de grandeur des erreurs associées aux défauts géométriques du montage.

BIBLIOGRAPHIE

1. LAMPARD (D.G.), A new theorem in electrostatics, *Proc. IEE*, Part C, Monograph N° 217 U, January 1957.
 2. Van der PAUW, *Philips Research Reports*, 13, 1958, pp. 1-9.
 3. ELNĚKAVĚ (N.), Conception, calcul et réalisation des étalons fondamentaux de capacité électrique, "Congrès IMEKO V", 1970, Rapport D-ST-36.
 4. ELNĚKAVĚ (N.), Deux étalons calculés de capacité électrique, *Bulletin d'Information du Bureau National de Métrologie (France)*, 4, N° 13, 1973, pp. 3-9.
-

**Référence de tension électrique
par l'effet Josephson (*)**

Par V. KOSE, F. MELCHERT, H. FACK et W. HETZEL

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Allemagne)

(Document CCE/72-4)

En utilisant l'effet Josephson il est possible, pour la première fois, de réaliser une tension électrique de référence. La valeur de cette tension continue U est donnée par la relation

$$U = \frac{h}{2e} \cdot n \cdot f ,$$

où h est la constante de Planck, e la charge électrique élémentaire, f la fréquence de la microonde rayonnée sur la jonction Josephson et n le rang de l'échelon utilisé. $h/2e$ est une constante naturelle et en choisissant le même nombre n et la même fréquence f on obtient toujours la même tension continue fixe. Par comparaison, il est possible de contrôler la stabilité de l'étalon national primaire de force électromotrice, réalisé par un groupe d'éléments Weston.

L'appareil de mesure de la P.T.B. construit en 1970⁽¹⁾ fut perfectionné de telle sorte que l'incertitude des résultats a pu être diminuée d'un facteur 10. Maintenant, un klystron stabilisé

* Publié en allemand dans PTB-Mitteilungen, 82, N° 4, 1972, S. 230-232.

(1) KOSE (V.), MELCHERT (F.), FACK (H.) und SCHRADER (H.-J), Die Bestimmung von e/h mit Hilfe des Josephson-Effektes. PTB-Mitt., 81, 1971, S. 8.

à 70 GHz est utilisé au lieu d'un émetteur à microondes de fréquence 10 GHz. Ainsi, la largeur des échelons qui était d'environ 20 μA pour 1 mV a pu être portée à environ 200 μA pour 1,5 mV. Par mise en série (fig. 1) de deux jonctions Josephson (contacts à pointe Nb-Nb) alimentées indépendamment, une tension continue Josephson d'environ 3 mV fut atteinte. Cela correspond à une diminution de l'influence des tensions thermoélectriques et à une amélioration du rapport signal/bruit pour le galvanomètre de zéro G_1 . L'effet des perturbations électriques environnantes (dues principalement aux commutations) a pu être diminué par un blindage soigné de tout l'appareil de mesure, de sorte que les mesures sont maintenant possibles sans perturbation à toute heure du jour.

Pour comparer la tension continue Josephson à la force électromotrice des éléments Weston, on a réalisé, à l'aide de résistances uniformes de 10 Ω sélectionnées grâce à l'obligeance du constructeur (E.S.I.), une résistance potentiométrique dont le rapport R_2/R_1 ne s'écarte de sa valeur nominale (350 $\Omega/1\Omega$) que d'environ 1×10^{-6} ; la résistance de 1 Ω est réalisée dans ce cas par un couplage en parallèle de résistances de 10 Ω en utilisant un dispositif du type "Hamon". L'interdépendance des grandeurs d'influence est très petite (coefficient de température du rapport : $0,2 \times 10^{-6}/\text{K}$, coefficient de puissance des résistances particulières : $< 0,02 \times 10^{-6}/\text{mW}$). La mesure du rapport (à l'aide d'un comparateur d'après Kusters) est possible avec une incertitude totale de 2×10^{-8} seulement.

Le rapport de résistance et la fréquence sont contrôlés chaque jour de mesures. f est comparée directement à l'étalon de fréquence à césium de la P.T.B. Ainsi, l'exactitude de la fréquence est assurée à 1×10^{-9} au moins.

Pendant une série de mesures, pour comparer la tension Josephson à la pile étalon, le circuit de compensation constitué par l'élément Weston (EW dans la figure 1), le galvanomètre G_2 et la résistance R_2 restent toujours fermés. Le courant potentiométrique I est contrôlé de façon que l'équilibre du galvanomètre G_2 soit toujours maintenu à l'intérieur de $\pm 5 \times 10^{-9}$. Pour le tarage du zéro dans le circuit de compensation Josephson, le courant de la résistance R_1 est tout d'abord commuté dans la résistance équivalente R'_1 de façon que la source de courant reste constamment chargée; lors de ce tarage la puissance microonde est déconnectée, de telle sorte que les jonctions Josephson ne fournissent pas de tension. A l'aide d'un couplage Lindeck-Rothe la tension thermoélectrique dans le circuit de mesure est compensée.

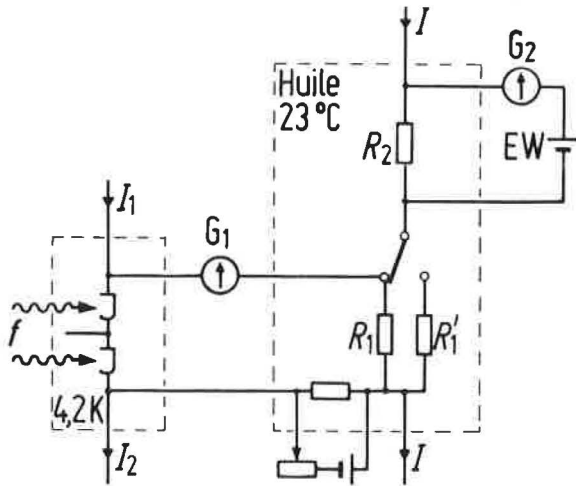


Fig. 1.

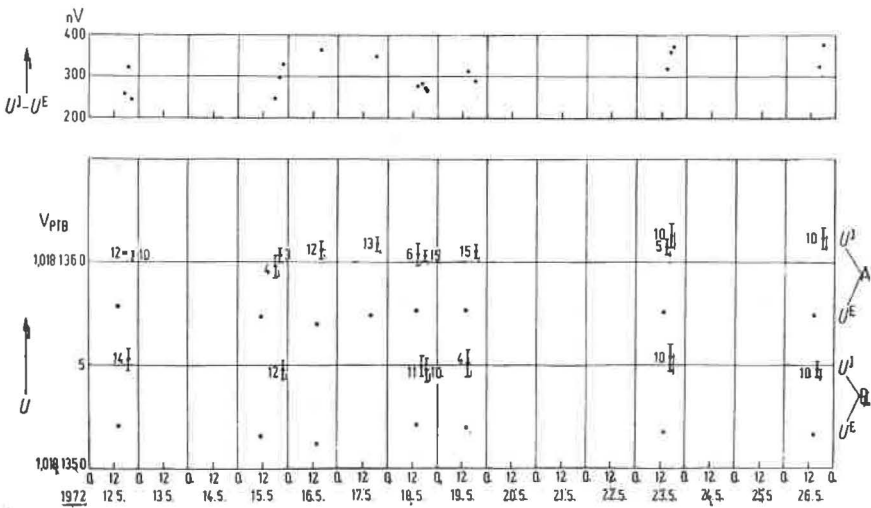


Fig. 2.

La puissance microonde de fréquence f est ensuite transmise aux jonctions ; on obtient ainsi - pour des courants continus présélectionnés I_1 et I_2 - les échelons de tension désirés (par exemple deux fois 10 échelons). Par l'ajustage précis de f (69 jusqu'à 71 GHz, ajustable numériquement par échelons de 1×10^{-9}) le galvanomètre G_1 est ramené au zéro. Ensuite, le contrôle du zéro est répété. En général, le réglage de fréquence n'est nécessaire qu'au commencement de la série de mesures pour amener au zéro le galvanomètre G_1 le mieux possible. La sensibilité atteinte est d'environ 30 mm/nV, correspondant à 90 mm pour le millionième d'une tension de 3 mV ; elle est contrôlée à chaque série de mesures. En outre, on s'assure pour chaque jonction Josephson, par variation des courants auxiliaires en conservant toute la sensibilité galvanométrique, que les échelons et l'intensité de courant à tension nulle ne montrent pas d'inclinaison.

La période d'un cycle de mesure "zéro - palier-zéro" est de deux minutes ; cette période résulte de la période transitoire de l'amplificateur photoélectrique du galvanomètre. Une répétition de la mesure du zéro est nécessaire pour enregistrer la dérive de la tension thermoélectrique qui, grâce au blindage thermique spécial des fils de potentiel dans le cryostat (réservoir d'hélium), n'est que de l'ordre de 0,1 nV/min après une période de mise en oeuvre d'environ deux heures.

La figure 2 représente les résultats d'une série de mesures effectuées du 12 au 26 mai 1972. A chaque mesure, la f.é.m. de deux piles étalons (A et B) placées dans un thermostat à 30 °C fut déterminée d'une part par comparaison à des éléments du groupe primaire de la P.T.B. (valeurs U^E) et d'autre part par comparaison aux tensions continues Josephson. Pour l'évaluation de ces résultats, l'appareil de mesure Josephson fut considéré comme une source de tension étalon et l'on a admis arbitrairement pour le quotient fréquence/tension ($2e/h$) la valeur 483 593,46 GHz/ V_{PTB} ; à l'équilibre des deux circuits on a ainsi :

$$U^J = \frac{R_2}{R_1} n \cdot f \cdot \frac{h}{2e} .$$

A l'aide de cette équation les tensions U^J de chaque série de mesures furent calculées (fig. 2) ; on a indiqué en plus le nombre des mesures particulières et l'étendue de la dispersion (écart quadratique moyen d'une seule mesure). Cette manière d'évaluation et de représentation à l'aide d'une valeur de $2e/h$

fixée arbitrairement permet d'identifier séparément les effets des grandeurs d'influence de l'appareil de mesure Josephson d'une part et de l'étalon primaire d'autre part.

Si, maintenant, les différences $U^J - U^E$ pour les deux éléments A et B sont déterminées, il en résulte une moyenne arithmétique des différences de tension de 307 nV avec un écart quadratique moyen de la moyenne arithmétique (1σ) de ± 10 nV seulement, correspondant à $\pm 1 \times 10^{-8}$ pour 1 V. La dernière étape fut de rendre nulle la moyenne arithmétique des différences de tension en corrigeant la valeur admise pour $2e/h$.

L'écart quadratique moyen de 1×10^{-8} comprend toutes les erreurs fortuites, y compris celles qui se manifestent dans la mesure quotidienne du rapport de résistance R_2/R_1 et dans la comparaison des deux piles étalons A et B avec celles du groupe primaire, et qui résultent du bruit thermique du galvanomètre G_1 . Les erreurs systématiques possibles suivantes doivent en plus être considérées pour :

- le rapport de résistance R_2/R_1 (y compris le pourcentage systématique de l'influence de la température et de l'échauffement propre) 2×10^{-8}
- la mesure comparative de la pile étalon à la tension $I.R_2$ (en particulier le pourcentage systématique de la tension thermoélectrique dans le circuit de mesure) 2×10^{-8}
- la mesure comparative de la pile étalon dans le thermostat à 30 °C à l'élément du groupe primaire à 20 °C (compensation pour une différence d'environ 500 μ V) 2×10^{-8}
- l'effet de l'incertitude dans la détermination de la température de l'étalon primaire 2×10^{-8}

Les erreurs des autres grandeurs d'influence sont négligeables comparées à celles qui sont mentionnées ci-dessus.

Par conséquent, il est possible de contrôler par l'effet Josephson la stabilité de l'étalon national primaire de force électromotrice réalisé par des éléments Weston avec une incertitude totale relative (1σ) de 4×10^{-8} .

Concernant le quotient des constantes naturelles $2e/h$, la valeur

$2e/h = (483\,593,606 \pm 0,020) \text{ GHz/V}_{\text{PTB(mai 1972)}}$
est valable d'après nos mesures ; ($V_{\text{PTB(mai 1972)}}$ signifie : réalisation de l'unité SI volt par la P.T.B. en mai 1972).

Nous remercions MM. Leppelt, Staben, Becker et Campe pour leur assistance au cours de ce travail.

**État des travaux
sur la conservation du volt légal des États-Unis
au moyen de l'effet Josephson en courant alternatif**

Par B. F. FIELD

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

(Traduction du Document CCE/72-6)

Depuis le 1^{er} juillet 1972 on conserve le volt légal américain au moyen de mesures de $2 e/h$ en utilisant l'effet Josephson. Des mesures fiables de $2 e/h$ sont faites à peu près deux fois par semaine depuis 12 mois (fig. 1). En traitant par la méthode des moindres carrés les données relevées au cours de 1972, on a obtenu la meilleure valeur de $2 e/h$ valable pour la période fin juin début juillet 1972 :

$$2 e/h = 483\,593,420 \text{ GHz/V}_{\text{NBS}}$$

C'est le chiffre exact que l'on a adopté pour conserver le volt.

Afin de conserver le volt, des séries de mesures de $2 e/h$ sont faites tous les quinze jours. On fait des comparaisons de piles étalons entre le groupe de piles de travail de $2 e/h$ et deux étalons de contrôle (chacun comprenant six piles saturées) avant et après les mesures du groupe de travail de $2 e/h$ au moyen d'une jonction Josephson (fig. 2). De plus, au cours de la série, des comparaisons de piles étalons sont faites entre l'étalon de contrôle N° 2, le groupe de travail du VTP (Volt Transfer Program) et le groupe d'étalonnage courant. En général, une série comporte par jour quatre ou cinq mesures indépendantes d'une pile dans le groupe de travail de $2 e/h$ par rapport à la tension de la jonction.

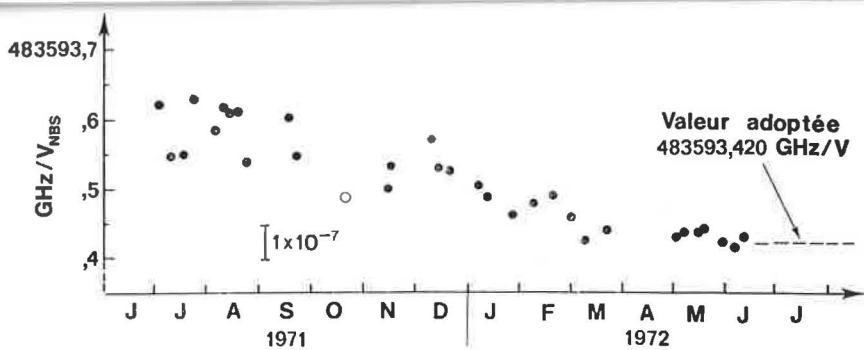


Fig. 1. — $2e/h$ en fonction du volt légal des États-Unis.

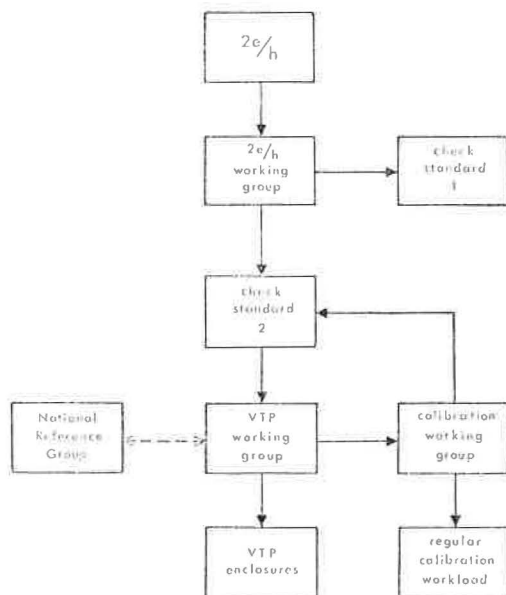


Fig. 2. — Conservation du volt au N.B.S.

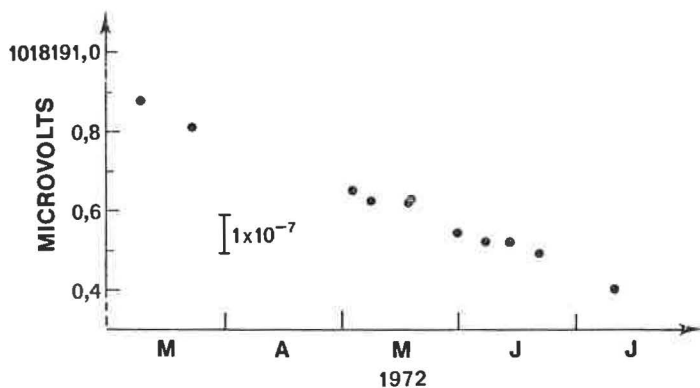


Fig. 3. — Mesures de $2e/h$ ($= 483\,593,420$ GHz/V) en fonction de la force électromotrice moyenne de l'étalon de contrôle N° 1.

Avant de tenir compte des résultats d'une série dans l'évaluation du volt légal, on fait plusieurs contrôles statistiques pour vérifier que le processus est stationnaire. L'écart-type de quatre ou cinq mesures faites au cours d'une série ne doit pas dépasser la limite du contrôle statistique. On tient également un relevé des mesures pour les deux étalons de contrôle. Si les forces électromotrices déterminées par la série sur $2 e/h$ diffèrent de plus de 1×10^{-7} de la moyenne des cinq dernières séries, on considère que la série n'est pas dans les limites de contrôle. Pour la réévaluation du groupe de travail du VTP qui sert de volt légal américain, on ne tient compte des résultats d'une série que s'ils sont dans les limites du contrôle statistique.

Si une mesure sort des limites du contrôle, des mesures complémentaires sont faites dès que possible et l'on vérifie l'installation de mesure de $2 e/h$. S'il n'y a aucun problème avec cette installation et si les mesures ultérieures concordent avec la mesure anormale, on réajuste alors le volt d'après les nouvelles mesures.

La moyenne des cinq dernières valeurs de la f.é.m. attribuées au groupe de travail du VTP au moyen des mesures de $2 e/h$ en utilisant le chiffre adopté, sert à prévoir la f.é.m. pour la période qui s'écoule entre la dernière mesure de $2 e/h$ et la suivante. On détermine la dérive du groupe de travail du VTP par un ajustement par la méthode des moindres carrés sur les résultats des trois à six derniers mois. On applique le taux de dérive à la moyenne des cinq derniers points pour prévoir une valeur du groupe de travail du VTP sur les deux semaines à venir. On change toutes les semaines (si c'est nécessaire) la f.é.m. attribuée au groupe de travail du VTP et l'on pense que ce changement restera toujours inférieur à $0,03 \mu\text{V}$.

Le mode opératoire décrit est préliminaire et peut être mis à jour si besoin est, mais nous pensons par cette façon de faire :

1. Eliminer toute dérive à long terme dans le volt légal américain.
2. Compenser les fluctuations d'un mois à l'autre dans le volt légal américain.
3. Ne pas introduire de sauts importants (de 1×10^{-7} ou davantage) dans le volt légal américain.
4. Eliminer toute incertitude aléatoire dans les mesures de $2 e/h$ jusqu'à un niveau négligeable.

Avec ce système, nous pensons que nous pouvons conserver indéfiniment le volt légal américain en concordance avec le chiffre exact que nous avons adopté à mieux que 1×10^{-7} .

La figure 3 montre quelques résultats de mesures de $2 e/h$ par rapport à la f.é.m. moyenne de l'étalon de contrôle N° 1 placé dans une nouvelle enceinte construite par R.D. Cutkosky. Bien que les forces électromotrices des piles varient, la variation est très uniforme. Un ajustement linéaire par la méthode des moindres carrés présente un écart-type de $0,02 \mu\text{V}$.

(15 août 1972)

Référence de tension utilisant l'effet Josephson alternatif

Par F. DELAHAYE

Laboratoire Central des Industries Électriques (France)

(Document CCE/72-21)

L'effet Josephson alternatif permet d'obtenir une tension continue U_j vérifiant la relation :

$$U_j = n \times \frac{h}{2e} \times f$$

où f est la fréquence du rayonnement hyperfréquence irradiant la jonction Josephson, n un entier représentant le rang de l'échelon de courant à tension constante où se trouve polarisée la jonction, h la constante de Planck et e la charge de l'électron.

La tension U_j , reproductible avec la précision à laquelle la fréquence f peut être mesurée, permet alors de contrôler la stabilité de la base nationale de force électromotrice représentée par un ensemble de piles Weston.

La réalisation de l'appareillage permettant de comparer la tension U_j à la force électromotrice d'une pile étalon a été entreprise au L.C.I.E. au début de 1972. On utilise un diviseur à résistances fixes, constitué par une résistance de 10Ω et une de $10\,000 \Omega$, alimenté par quatre piles au mercure de $1,35 \text{ V}$, une cinquième pile montée en tampon servant d'élément régulateur (fig. 1). Les résistances de réglage R_1 et R_2 sont ajustées de façon à annuler la déviation du microvoltmètre M et du galvanomètre G . Ce dernier est alors court-circuité et dans ces conditions la stabilité du courant poten-

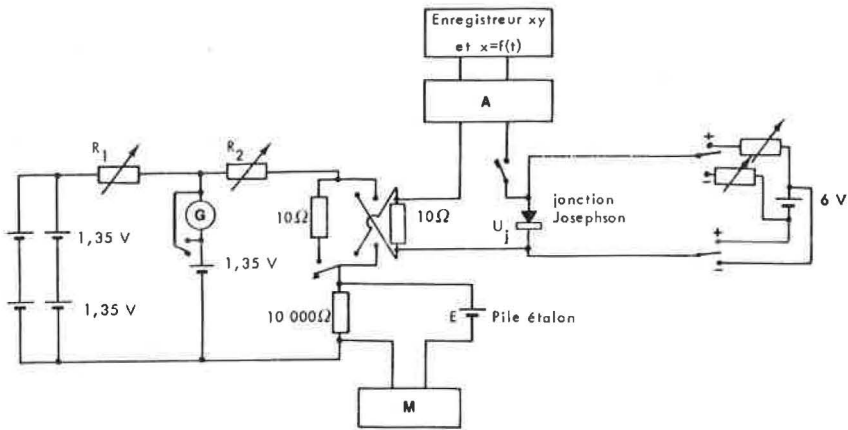


Fig. 1. — Schéma de l'appareillage de mesure en courant continu.

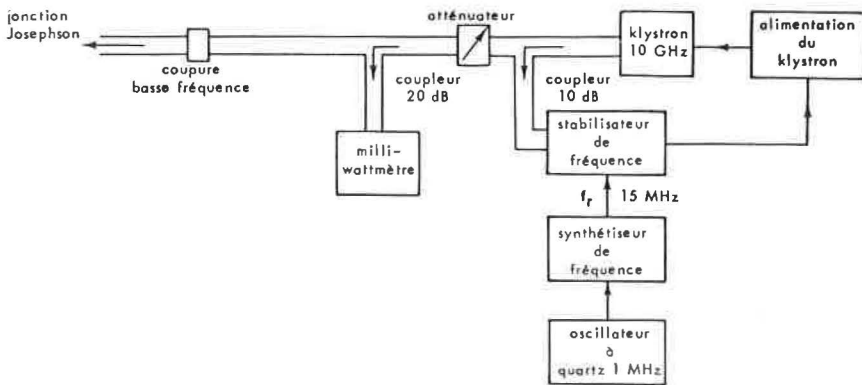


Fig. 2. — Schéma de l'appareillage hyperfréquence.

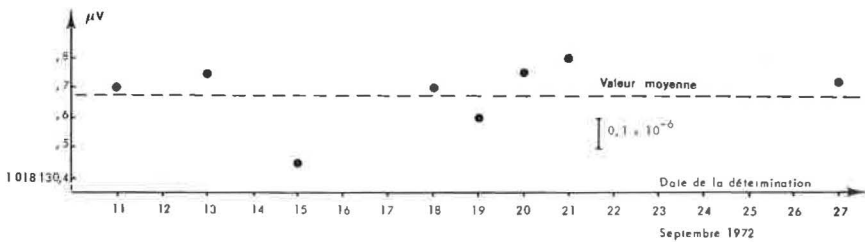


Fig. 3. — Résultats de huit mesures de force électromotrice (Pile N° 1).

tiométrique est de $0,2 \times 10^{-6}$ par heure, l'ensemble des piles et des résistances étant immergé dans un bain d'huile à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Le courant traversant la résistance de $10\ \Omega$ peut être inversé, une résistance auxiliaire de $10\ \Omega$ évitant la coupure du courant potentiométrique au moment de l'inversion.

Le circuit de l'amplificateur galvanométrique A est équilibré en ajustant la fréquence f de l'irradiation hyperfréquence, ce qui permet d'égaliser la tension U_j à la différence de potentiel aux bornes de la résistance de $10\ \Omega$, c'est-à-dire à $1,018.. \text{ mV}$.

Le rapport des deux résistances du diviseur est étalonné au L.C.I.E. en utilisant un dispositif du type "Hamon" permettant d'obtenir une résistance de $10\ 000\ \Omega$ et une de $100\ \Omega$ dans un rapport connu avec dix résistances de $1000\ \Omega$ connectées en série puis en parallèle, ainsi qu'un ensemble de dix résistances de $10\ \Omega$ comparées à l'aide d'un potentiomètre comparateur de courant continu et permettant d'obtenir deux résistances de $10\ \Omega$ et $100\ \Omega$ par mise en série.

La précision de l'étalonnage de ce rapport est de 1×10^{-7} et son coefficient de température est de $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Les jonctions utilisées sont du type pointe de niobium-plan de niobium qui fournit au niveau $1,018\ \text{ mV}$ des échelons de courant à tension constante d'amplitude $150\ \mu\text{A}$ environ correspondant à une fréquence $f = 10,7\ \text{ GHz}$ et à $n = 46$. Ces échelons sont obtenus pour une puissance du rayonnement hyperfréquence de 20 à $30\ \text{ mW}$.

Les forces électromotrices d'origine thermique apparaissant dans le circuit de mesure de la tension Josephson sont éliminées en inversant simultanément le courant potentiométrique à travers la résistance de $10\ \Omega$ et le courant alimentant la jonction Josephson qui est alors polarisée sur l'échelon $n = 46$ de polarité opposée.

L'intervalle de temps séparant deux inversions est de l'ordre de $1\ \text{ min}$ du fait de la constante de temps de l'amplificateur galvanométrique, si bien que l'on doit tenir compte de la dérive moyenne de la force électromotrice thermique pendant ce laps de temps. Celle-ci a été réduite à $0,15\ \text{ nV/min}$ (pour une force électromotrice parasite d'environ $1\ \mu\text{V}$) en utilisant à l'intérieur du cryostat un blindage des fils de mesure par un tube de cuivre assurant une bonne homogénéité de la température le long de ces fils.

La figure 2 montre le schéma de l'appareillage hyperfréquence. Le stabilisateur de fréquence maintient la fréquence

f du klystron de telle sorte que la différence entre f et un harmonique d'une fréquence de référence f_r soit égale à la fréquence f_o d'un oscillateur à quartz interne du stabilisateur :

$$f = (N \cdot f_r) - f_o.$$

On utilise une fréquence f_r de 15 MHz, l'harmonique $N = 716$ et $f_o = 40,9$ MHz pour obtenir $f = 10,7$ GHz.

La stabilité de la fréquence f dépend principalement de celle de f_r qui est fournie par un synthétiseur de fréquence piloté par un oscillateur à quartz à 1 MHz placé dans une enceinte thermorégulée. La stabilité de cet oscillateur est de l'ordre de 5×10^{-9} pour une période de 10 jours.

Le quartz à 1 MHz est étalonné à l'aide d'une fréquence de 100 kHz liée à l'horloge à césium du Centre National d'Etudes des Télécommunications et transmise directement au L.C.I.E. par ligne téléphonique. Finalement, la fréquence de l'irradiation est connue avec une précision de 5×10^{-9} .

Le synthétiseur de fréquence permet d'ajuster la fréquence de l'irradiation avec une résolution de 1×10^{-9} .

Une série de huit mesures a été effectuée du 11 au 27 septembre 1972 en utilisant un ensemble de quatre piles étalons dans une enceinte régulée à 30 °C. Sur la figure 3 sont portées les huit valeurs ainsi trouvées pour la force électromotrice d'une des piles étalons, la fréquence étant la même pour ces huit expériences ainsi que la valeur attribuée à $\frac{e}{h}$, ce qui assure une valeur constante pour Uj .

L'écart quadratique moyen de ces huit valeurs est de 1×10^{-7} , ce qui représente donc l'incertitude sur le rapport Uj/E due à l'erreur de détermination des deux équilibres ainsi qu'à l'influence de la température sur le diviseur $10 \Omega - 10\ 000 \Omega$.

L'erreur d'étalonnage (1×10^{-7}) de ce diviseur intervient en plus, si bien que l'on peut estimer à 2×10^{-7} l'erreur maximale sur le rapport Uj/E .

La comparaison de E à la base nationale (groupe F4) de force électromotrice permet alors d'attribuer à $2\frac{e}{h}$ une valeur en fonction de cette base.

La valeur trouvée est :

$$2\frac{e}{h} = 483,594\ 64 \pm 3 \times 10^{-7} \text{ MHz}/\mu\text{V}_{\text{L.C.I.E.}}$$

Cette dernière comparaison étant faite à 1×10^{-7} près en raison de l'incertitude due à la température, l'erreur maximale

sur la valeur de $2\frac{e}{h}$ est donc de 3×10^{-7} .

C'est donc avec cette incertitude que l'on peut actuellement contrôler la stabilité de la base nationale de force électromotrice.

Les jonctions ont été préparées au Service Recherche du L.C.I.E. par Mr Colombeau à qui nous adressons nos remerciements.

Valeur numérique de la constante $2 e/h$

Par J. J. DENTON

National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

(Traduction du Document CCE/72-24)

Au cours des toutes dernières années, des déterminations de la constante $2 e/h$ ont été faites par l'Université de Pennsylvanie et par quatre laboratoires nationaux : N.B.S., N.S.L., P.T.B. et N.P.L. Chaque laboratoire a mesuré la constante par rapport à son unité nationale de f.é.m. conservée au moyen de piles étalons. Il est manifeste qu'au moins certaines, ou peut-être toutes les unités concernées, se sont modifiées au cours du temps.

Afin d'avoir une base commune pour la tension de référence, on suggère que la valeur de la constante en unités SI se rapporte à l'unité de f.é.m. du B.I.P.M. au 1^{er} janvier 1969. Cette unité a été adoptée et fixée, après étude des résultats des déterminations absolues faites à cette époque, comme étant aussi proche de l'unité SI que la précision des déterminations le permettait. Le tableau ci-après donne les valeurs mesurées de $2 e/h$ pour chaque laboratoire et la valeur extrapolée pour le 1^{er} janvier 1969. Elle est corrigée de la différence estimée à cette époque entre l'unité du laboratoire et celle du B.I.P.M., en tenant compte des résultats des comparaisons triennales de 1967 et 1970 et des changements intervenus dans les unités en 1969. Les quatre valeurs ainsi obtenues sont en bon accord et donnent une valeur moyenne pour la constante $2 e/h = 483\,594,0$ GHz/V, dans laquelle V est l'unité BIPM au 1^{er} janvier 1969.

VALEURS DE $2 e/h$ en unités nationales

GHz/ V_{LAB} moins 483 590,0

(Les chiffres entre parenthèses sont les incertitudes estimées d'un écart-type)

Unité : 1×10^{-6}

N.B.S.		N.S.L.		P.T.B.		N.P.L.	
1970-1971	3,72* (0,12)	Août 1970	3,845 (0,2)	Automne 1970	3,7 (0,4)	Avril 1969	4,1 (2,0)
Juil.-Août 1971	3,589 (0,05)	Juin-Juil. 1971	3,80 (0,1)	Mai 1972	3,606 (0,04)	Juil. 1970	4,2 (0,8)
Avril 1972	3,444 (0,05)	Mars-Avr. 1972	3,733 (0,1)			Juil. 1971	4,15 (0,2)
1 ^{er} juillet 1972	3,420 (0,05)					Avril 1972	4,00 (0,2)
Valeur extrapolée pour le							
1 ^{er} janvier 1969	4,09		3,97		3,8		4,4

* Valeur de l'Université de Pennsylvanie

Correction pour la différence $V_{LAB} - V_{BIPM}$

Différence évaluée pour
le 1^{er} janvier 1969 :

$V_{LAB} - V_{BIPM}$	+ 0,11	0,00	- 0,17	+ 0,66
Valeur corrigée	4,04	3,97	3,88	4,08

Moyenne des valeurs corrigées : 3,99

ANNEXE E 12

Convertisseurs thermiques courant alternatif-courant continu

Par S. IWAMOTO et H. HIRAYAMA

Electrotechnical Laboratory (Japon)

(Traduction du Document CCE/72-13)

On utilise largement les convertisseurs thermiques courant alternatif - courant continu pour obtenir des étalons de courant et de tension alternatifs. L'E.T.L. fait des travaux de recherche sur leur amélioration. On a fabriqué différents types de convertisseurs thermiques et déterminé leurs spécifications à partir de l'analyse détaillée de leurs caractéristiques. De plus, on a construit le comparateur pour effectuer des mesures précises avec les convertisseurs.

CONVERTISSEURS DE COURANT

Les convertisseurs thermiques sont habituellement du type thermocouple isolé dans le vide, avec un fil de résistance et une soudure simple dans une ampoule de verre de 30 mm de diamètre (fig. 1). On a d'abord étudié les effets de la géométrie de l'élément chauffant, de la soudure et des traversées de courant sur les caractéristiques du thermocouple. On a confirmé que la f.é.m. de sortie était surtout affectée par le diamètre de l'élément chauffant.

On a fait les comparaisons de la différence courant alternatif (1592 Hz) - courant continu en utilisant le comparateur pour sept types différents de convertisseurs, dont deux à soudures multiples (fig. 2). La variation de la différence c.a. - c.c. est d'environ 1×10^{-6} (en valeur efficace) entre plusieurs convertisseurs de même type et d'environ 3×10^{-6} pour des convertisseurs de types différents. Entre des convertisseurs de 10 et 30 mA la variation de la différence

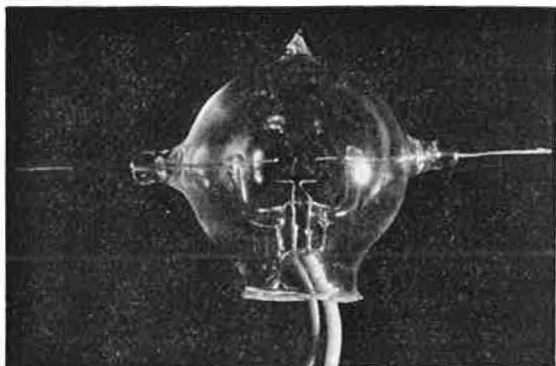


Fig. 1. — Thermocouple dans le vide à soudure simple.

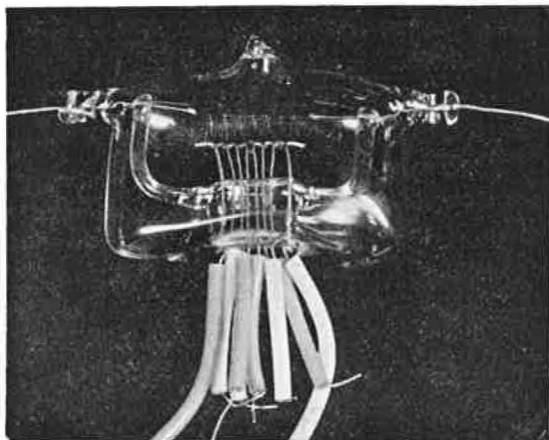


Fig. 2. — Thermocouple dans le vide à soudures multiples.

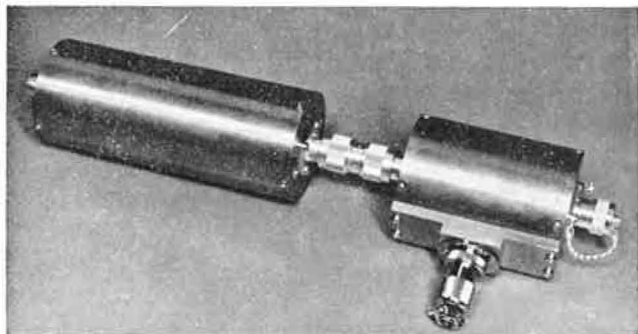


Fig. 3. — Convertisseur thermique de tension.

c.a. - c.c. est inférieure à 2×10^{-6} . On n'a constaté aucune différence notable pour la différence c.a. - c.c. entre les types à soudure simple ou à soudures multiples. Pour ce qui est de l'effet de la fréquence, la variation relative de la différence c.a. - c.c. est inférieure à 1×10^{-6} pour ces convertisseurs jusqu'à 50 kHz.

Par ailleurs, on a calculé les valeurs absolues de la différence c.a. - c.c. en utilisant une forme modifiée de la formule donnée par F.C. Widdis⁽¹⁾. L'exactitude est d'environ 5×10^{-6} à cause de l'incertitude sur le coefficient de Thomson, sur la conductivité thermique du fil de chauffage, etc.

Comme résultat des expériences et des calculs ci-dessus, on estime que l'on peut déterminer la différence c.a. - c.c. d'un convertisseur thermique de courant avec une exactitude meilleure que 10×10^{-6} jusqu'à 50 kHz.

Chaque thermocouple est monté dans l'axe d'un cylindre de cuivre avec des connecteurs d'arrivée coaxiaux de type N et une double sortie de f.é.m. Le tableau I donne les spécifications et les caractéristiques typiques des convertisseurs thermiques de courant de 10 et 30 mA utilisés comme étalons. On les utilise dans un domaine de fréquence compris entre 40 Hz et 100 kHz.

CONVERTISSEURS DE TENSION

Comme l'indique la figure 3, le convertisseur thermique de tension se compose d'un convertisseur de courant de 10 mA (à droite) et d'une résistance en série (à gauche). Les domaines de tension du convertisseur vont de 1 à 100 V et les fréquences utilisées de 40 Hz à 100 kHz. La résistance en série est de $100 \Omega/V$; elle est constituée de une à trois résistances (couches minces en Ni-Cr-Al) montées en série. Pour une seule résistance la puissance dissipée est limitée à moins de 0,4 W ; le coefficient de température est inférieur à $25 \times 10^{-6}/^{\circ}C$. Ces résistances sont montées dans l'axe d'un cylindre en cuivre avec connecteurs coaxiaux de type N.

La variation des caractéristiques du convertisseur de tension en fonction de la fréquence résulte essentiellement de

(1) WIDDIS (F.C.), *P.I.E.E.*, 109-C, 1962, p. 328.

TABLEAU I

Caractéristiques de convertisseurs de courant

Capacité de charge (pA)	Elément chauffant			Thermocouple ⁽¹⁾		Force électromotrice				
	Matière	Diamètre (en μm)	Longueur (en mm)	Résistance (en Ω)	Longueur (en mm)	Résistance (en Ω)	Tension (en mV)	Coefficient de température (en $10^{-2}/^{\circ}\text{C}$)	Temps de réponse (en s)	Différence due à l'inversion du c.c. ⁽²⁾ (en 10^{-6})
{	75 Ni	20	7	30	3	6	7,5	- 0,13	1,2	30
	17 Cr									
	8(Si + Mn)									
	(Nikrothal-L)									
{	75 Ni	40	5	6	3,5	6	8,3	- 0,09	1,2	12
	20 Cr									
	2,5 Al									
	2,5 Cu (Evanohm)									

(1) On utilise des couples thermoélectriques chromel-constantan.

(2) $\Delta E/E$ pour le même courant de chauffage.

(3) La capacité entre les deux fils d'alimentation de l'élément chauffant est 0,07 pF à 1 MHz.

(4) La résistance de fuite des traversées de courant est $> 8 \Omega$.

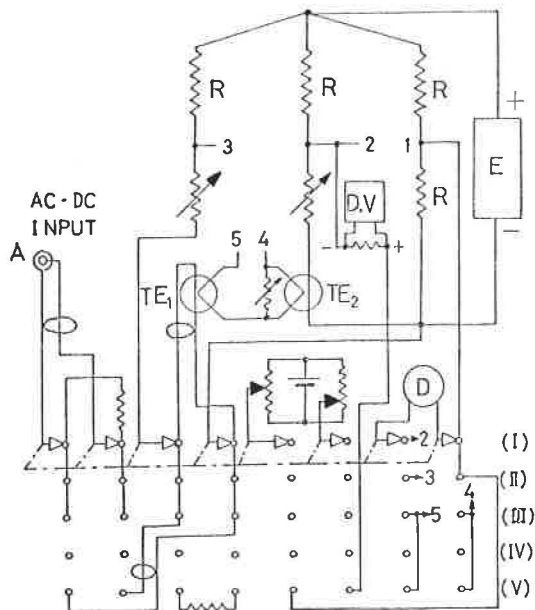


Fig. 4a. — Circuit du comparateur.

E, Alimentation stabilisée de précision; R, résistance bobinée de précision dans une enceinte hermétique.

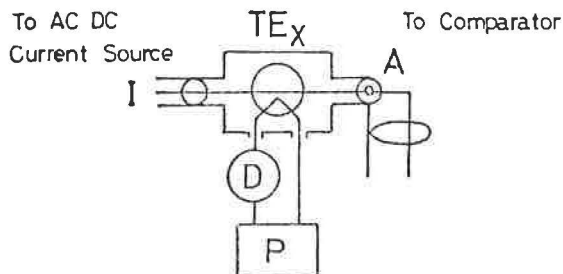


Fig. 4b. — Connexion du convertisseur thermique de courant.

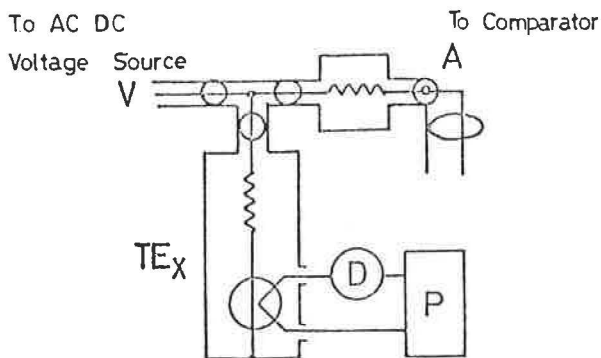


Fig. 4c. — Connexion du convertisseur thermique de tension.

celle de la résistance en série. En conséquence, on a mesuré la variation des caractéristiques de la résistance en série en fonction de la fréquence par deux méthodes fondées sur le calcul de la résistance d'un fil rectiligne (10 Ω , 100 Ω et 1 k Ω). L'une est la méthode intégrée dans laquelle on utilise le comparateur et des convertisseurs de courant de 10 et 20 mA ; l'autre utilise un pont à transformateur de rapport. Les expériences ont confirmé que la variation de la résistance en série en fonction de la fréquence est inférieure à 50×10^{-6} à 50 kHz.

COMPARATEUR

La figure 4a montre le circuit pour comparer les convertisseurs thermiques et la figure 4b donne la connexion des convertisseurs de courant. Lorsqu'on compare le convertisseur de courant TE_X au convertisseur étalon TE_1 , le commutateur est dans la position V et le même courant de chauffage passe dans TE_X et TE_1 montés en série. On maintient toujours constante la f.é.m. de sortie de TE_X en réglant le courant alternatif ou le courant continu dans les deux cas. On obtient la différence des courants alternatif et continu à partir de la f.é.m. de sortie de TE_1 , que l'on mesure par la modification du courant continu de chauffage de TE_2 . Le convertisseur TE_2 est choisi de mêmes caractéristiques que TE_1 afin de compenser la dérive provoquée par la variation de la température ambiante. On lit le changement du courant de chauffage de TE_2 directement en utilisant un voltmètre numérique.

On compare également les convertisseurs de tension en utilisant le même comparateur dans lequel le convertisseur TE_X est monté suivant le schéma de la figure 4c.

On a obtenu avec ce comparateur une résolution de $0,1 \times 10^{-6}$. Comme la capacité d'entrée du comparateur est inférieure à 15 pF, on estime que l'incertitude de la comparaison est inférieure à 1×10^{-6} à 100 kHz. Les domaines de mesure sont les suivants : 10, 20 et 30 mA pour le courant, 1 à 100 V pour la tension et 40 Hz à 100 kHz pour la fréquence.

CONCLUSION

Comme indiqué ci-dessus, on a établi des étalons de courant et de tension alternatifs avec des exactitudes meilleures que 10×10^{-6} pour le courant et meilleures que 50×10^{-6} pour la tension jusqu'à 50 kHz. On envisage également d'étendre les domaines de courant, de tension et de fréquence respectivement à 100 mA, 1000 V et 1 MHz.

ANNEXE E 13

Étalons et comparateur du N.P.L. pour le passage courant alternatif — courant continu

National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

(Traduction du Document CCE/72-23)

On utilise des convertisseurs thermiques à soudures multiples (C.T.S.M.) dans le domaine des basses fréquences comme étalons de transfert courant alternatif - courant continu et on leur attribue une erreur nulle. On dispose de convertisseurs pour les domaines de 5, 10, 30 et 50 mA.

On obtient une série d'étalons de tension en utilisant des convertisseurs thermiques à soude simple (C.T.S.S.) connectés à des résistances dans des montures coaxiales (fig. 1). Les C.T.S.S. utilisés sont de 5 et 10 mA et on leur attribue des corrections comme instruments de transfert courant alternatif - courant continu par comparaison aux C.T.S.M.

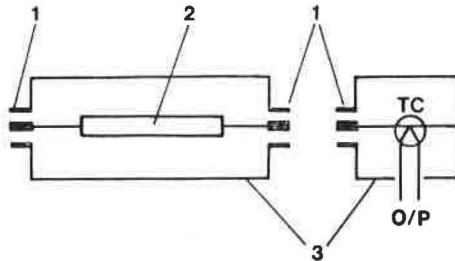


Fig. 1

1, Connecteur coaxial de précision (GR890) ; 2, Résistance en couche mince ; 3, Tube en laiton (50 mm de diamètre) ; TC, Convertisseur thermique à soude simple.

On a calculé qu'aux basses fréquences les erreurs des C.T.S.M. sont très inférieures à 1×10^{-6} . On pense que la variation de l'erreur à fréquence croissante sera moindre pour les C.T.S.S. que pour les C.T.S.M., car leur circuit électrique est plus simple.

Des comparaisons entre les deux types de convertisseurs montrent des différences de réponse à peine significatives à 50 kHz pour les instruments de 5 et 10 mA et des différences très faibles à cette même fréquence pour les instruments de 30 mA.

On attribue aux C.T.S.M. les variations apparentes des instruments de 5 et 10 mA, tandis qu'on admet que les C.T.S.S. présentent une variation d'erreur négligeable en fonction de la fréquence jusqu'à 50 kHz.

Les C.T.S.S. sont de fabrication commerciale et utilisent des matériaux spécifiés par le N.P.L. A basse fréquence les erreurs sont généralement inférieures à 5×10^{-6} , avec une proportion appréciable d'instruments pour lesquels les erreurs sont inférieures à 2×10^{-6} .

Des mesures par "échelons" en utilisant des C.T.S.S. de 5 et 10 mA connectés à des résistances dans des montures coaxiales permettent de déduire la réponse relative en fréquence de ces résistances, et de là celle des étalons de tension. On considère qu'une résistance de $1 \text{ k}\Omega$ n'introduit pas d'erreur significative.

La figure 2 donne le circuit de base du comparateur. Il est semblable à un comparateur utilisé au N.B.S. ; c'est fondamentalement un pont qui tend à réduire l'effet des variations de l'alimentation.

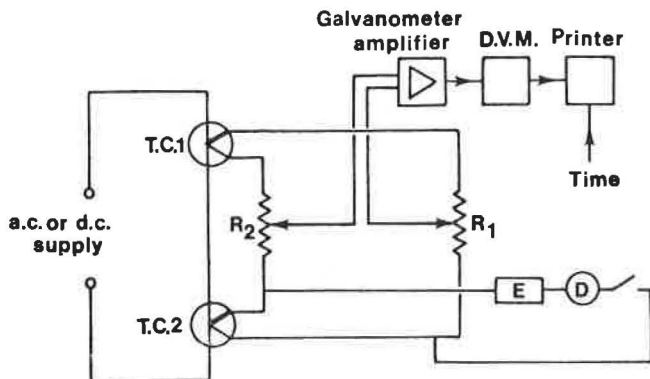


Fig. 2

T.C.1,2, Convertisseurs thermiques à soudure simple ; R_1 , $10 \times 100 \Omega$; R_2 , 100Ω ; E, Tension de référence réglable ; D, Détecteur de zéro à impédance élevée.

Pour comparer deux convertisseurs thermiques, on les alimente successivement avec un courant alternatif et un courant continu connus. A cause des erreurs liées au sens du courant deux mesures sont nécessaires pour le courant continu : une pour chaque polarité de l'alimentation. Si les propriétés du convertisseur sont différentes les courants d'alimentation en alternatif et en continu doivent être égalisés avec précision ; on utilise alors la sortie d'un convertisseur pour contrôler le courant d'alimentation. On fait des mesures à intervalles réguliers dans l'ordre courant alternatif, courant continu, courant continu inversé et enfin courant alternatif, de façon à éliminer les effets des dérives linéaires (par exemple des alimentations, des résistances, des forces thermoélectriques).

On équilibre le pont pour la première mesure en courant alternatif et les modifications suivantes sont obtenues par mesure de la tension de déséquilibre. On peut alors calculer la différence dans l'erreur de transfert entre les deux convertisseurs à partir de la différence entre la moyenne des lectures en courant alternatif et la moyenne des lectures en courant continu.

Pour atteindre une sensibilité de 1×10^{-6} dans la comparaison il est nécessaire de mesurer les variations de la tension de déséquilibre à mieux que 10 nV. Le voltmètre est une modification d'un amplificateur galvanométrique à cellule photoélectrique qui a amélioré la linéarité et possède une sortie analogique pour un voltmètre numérique. L'étendue de mesure du voltmètre est de $\pm 1 \mu\text{V}$, le niveau de bruit de 4 nV de crête à creux, le temps de montée de 4 s et les erreurs de linéarité sont inférieures au niveau de bruit (mesuré pour une résistance de source normale de 250 Ω).

La lecture du voltmètre numérique, ainsi que l'heure de la mesure sont imprimées automatiquement si on le désire.

Toute l'installation se trouve dans une pièce thermorégulée et protégée des radiofréquences.

**Version améliorée
du pont autoétalonnable à diviseur inductif
utilisé pour la comparaison d'étalons d'inductance**

Par E. ARRI et G. NOCE

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris (Italie)

(Document CCE/72-20)

Le pont à bras de rapport à couplage inductif pour la comparaison d'étalons d'inductance décrit dans une Note présentée au Comité Consultatif d'Electricité en 1965 [1] a été récemment remplacé par une version améliorée [2].

Les bras de rapport du pont sont encore réalisés par un diviseur inductif à sept décades (fig. 1) ; les améliorations introduites concernent essentiellement : le remplacement d'éléments de type commercial par des éléments spécialement conçus de construction plus simple et compacte, des connexions aux inductances mieux appropriées, l'emploi d'un système de détection plus sensible du type synchrone. Le pont, qui est

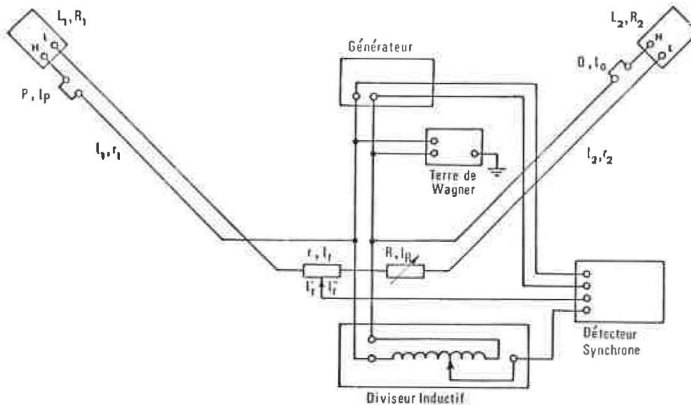


Fig. 1.- Réalisation actuelle du pont pour la comparaison d'étalons d'inductance (sans les écrans).

principalement employé pour les comparaisons entre les étalons d'inductance de référence de l'I.E.N., a été ainsi transformé d'un système à éléments en une structure autonome et paraît aujourd'hui représenter une alternative valable à d'autres méthodes, même proposées récemment [3] .

En utilisant les symboles adoptés dans la Note précédente, la résistance variable R consiste actuellement de deux parties. Les valeurs les plus élevées de la résistance sont obtenues au moyen d'une boîte à cinq décades plus compacte, avec résistances du type à film métallique et donc avec une inductance résiduelle variable plus réduite. La boîte est suivie d'une résistance à réglage continu conçue dans ce but, à fil hélicoïdal de deux matériaux, glissant avec un mouvement hélicoïdal sous deux contacts fixes. Grâce à la géométrie invariable, l'inductance résiduelle de cet élément est constante à ± 1 nH.

La résistance à fil r à prise de potentiel a été remplacée par un diviseur résistif du type Kelvin-Varley à trois décades, à géométrie aussi invariable, construit pour avoir une inductance totale l_r bien constante et des inductances équivalentes partielles l'_r et l''_r sensiblement plus petites.

Les résistances variables P et Q , qui peuvent être insérées pour les équilibrages auxiliaires de l'autoétalonnage et qui étaient constituées auparavant respectivement d'une résistance à fil et d'une résistance à décades, sont réalisées dans la nouvelle version au moyen d'éléments interchangeable à fiche de résistances différentes et d'inductances l_P et l_Q bien calculables, et en tout cas inférieures à quelques nanohenrys.

Partout où cela a été possible, les connexions entre les différents éléments ont été réalisées par un câble rigide tétra-axial constitué par un fil, qui représente l'un des conducteurs de connexion, et par trois conducteurs tubulaires coaxiaux au fil. Les conducteurs tubulaires de diamètre maximal et minimal sont respectivement les écrans externe et interne entre les deux conducteurs de connexion. Le tube moyen, second conducteur de connexion, est formé d'un faisceau de fils de cuivre isolés, disposés côte à côte le long des génératrices d'un cylindre. On réalise de cette façon un tube conducteur seulement dans le sens longitudinal, et on contrarie donc la circulation des courants parasites en réduisant les couplages inductifs avec les inducteurs.

Deux câbles tétra-axiaux, de 2,5 m de longueur et dont les axes forment un angle de 120° , constituent en particulier la connexion entre le pont et les inductances à comparer pour

limiter aussi bien que possible l'inductance mutuelle, dans le cas d'inductances non toroïdales. La connexion aux noeuds du pont est obtenue par des jonctions tétra-axiales appropriées légèrement flexibles.

Comme on l'a déjà expliqué dans la Note citée, ce pont est à même d'autoétalonner, au moyen de quelques équilibrages auxiliaires, ses inductances résiduelles, soit les inductances l_1 et l_2 des connexions aux inducteurs (maintenant inférieures à $2 \mu\text{H}$ et bien constantes grâce à la rigidité mécanique des câbles tétra-axiaux), soit encore les inductances l_R , l'_R et l''_R des éléments R et r à résistance variable. A la différence du procédé précédent, on utilise dans les équilibrages auxiliaires des inductances étalons de 10 et (ou) $3 \mu\text{H}$ et les éléments P et Q interchangeable à fiche. La caractéristique essentielle du pont pour rendre possibles et assez précis les autoétalonnages est sa possibilité d'exécuter des comparaisons à haute sensibilité, même maintenant avec des inductances de 1 à $10 \mu\text{H}$ et des rapports jusqu'à 1 : 100.

Les inductances mutuelles résiduelles entre les étalons à comparer et quelques capacités parasites dont les effets ne sont pas compensés par les écrans et la terre de Wagner, peuvent aussi être autoétalonnées par des équilibrages auxiliaires. Pour obtenir de meilleures précisions il faut en effet tenir compte aussi de ces autres paramètres parasites comme termes correctifs additionnels dans la formule (1) de la Note précédente.

On a ainsi amélioré d'un ordre de grandeur la précision des comparaisons par rapport à la première version, où on obtenait $\pm 1 \times 10^{-5}$ environ. En effet, même avec une erreur de phase du diviseur inductif comprise seulement entre $\pm 5 \times 10^{-5}$ rad, l'imprécision relative des comparaisons est maintenant estimée égale à $\pm (2 \times 10^{-6} + \frac{l^*}{L_1})$, où L_1 est l'inductance du plus petit des deux étalons à comparer et $l^* = 5 \text{ nH}$ pour des rapports de 1 : 1 à 1 : 3 et 10 nH pour des rapports jusqu'à 1 : 10. Avec un diviseur inductif plus précis, ou bien étalonné avec une précision supérieure, les résultats sont proportionnellement meilleurs.

BIBLIOGRAPHIE

1. ARRI(E.) et CHIUSANO (E.), Autodétermination des inductances parasites du pont à diviseur inductif utilisé pour la comparaison d'étalons d'inductance, *Comité Consultatif d'Electricité*, 11^e session, 1965, p. E 67.
 2. ARRI (E.) and NOCE (G.), A high accuracy self-calibrating bridge with coupled inductive ratio arms used for standard inductors comparison, *Intern. Symp. on Metrology, IMEKO*, Bratislava, 1972.
 3. DUNN (A.F.) and TSAO (S.H.), Ratio comparisons of impedance standards, *I.E.E.E. Trans. on Instrum. and Measur.*, IM-18, 1969, p. 276.
-

Rapport
sur la première comparaison internationale
d'instruments de mesure des faibles puissances à 10 GHz

Par R. ISHIGE

Electrotechnical Laboratory (Japon)

(Traduction du Document GT-RF/72-5)

C'est à la 11^e session du Comité Consultatif d'Electricité qui s'est tenue au B.I.P.M. en mai 1965 que fut prise la décision définitive de commencer une comparaison internationale d'instruments de mesure étalons pour les faibles puissances à la fréquence de 10 GHz.

Etant donné le grand nombre des laboratoires qui avaient demandé à participer à cette comparaison, ceux-ci ont été répartis en deux groupes, chaque groupe ayant un laboratoire pilote. Le premier groupe comprenait les cinq laboratoires suivants : Electrotechnical Laboratory (E.T.L., Japon), National Bureau of Standards (N.B.S., U.S.A.), Institut de Recherches des Télécommunications (I.R.T., Hongrie), Deutsches Amt für Messwesen und Warenprüfung (D.A.M.W., R.D.A.), Institut de Métrologie D.I. Mendéléév (I.M.M., U.R.S.S.). Le second groupe comprenait les sept laboratoires suivants : I.M.M., E.T.L., Conseil National de Recherches (N.R.C., Canada), National Standards Laboratory (N.S.L., Australie), Istituto Elettrotecnico Nazionale (I.E.N., Italie), Laboratoire Central des Industries Electriques (L.C.I.E., France), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (P.T.B., R.F.A.)

A l'époque, on avait désigné l'E.T.L. comme laboratoire pilote du premier groupe.

En juillet 1965, l'E.T.L. demanda aux laboratoires du premier groupe de faire des suggestions et de soulever des questions sur la comparaison ; il fit lui-même quelques propositions. En septembre, l'E.T.L. fut informé qu'en U.R.S.S. les mesures comparatives seraient effectuées à l'Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques (I.M.P.R.).

Après mûre réflexion, le laboratoire pilote organisa la circulation par permutation circulaire comme suit :

ETL → NBS → IRT → DAMW → IMPR → ETL.

Tous les étalons voyageurs prenant part à la comparaison devaient d'abord être envoyés à l'E.T.L. pour y être mesurés, envoyés ensuite à chacun des laboratoires participants pour la comparaison circulaire et, en fin de circuit, renvoyés à l'E.T.L. pour y être mesurés à nouveau.

En plus des laboratoires mentionnés ci-dessus, deux laboratoires du second groupe, le N.R.C. et l'I.E.N. exprimèrent le désir (respectivement en juin et en septembre 1966) de prendre part à la comparaison du premier groupe ; ils furent inclus dans la comparaison en septembre et en novembre 1966, après avis du B.I.P.M. Toutefois, ces deux laboratoires furent admis à prendre part à la comparaison à la double condition qu'ils ne fourniraient pas leurs propres étalons voyageurs et qu'ils exécuteraient leurs mesures après l'I.M.P.R. de façon à ne déranger aucun des autres laboratoires participants inscrits au plan de circulation initial. En conséquence, l'ordre final de circulation fut le suivant (fig. 1).

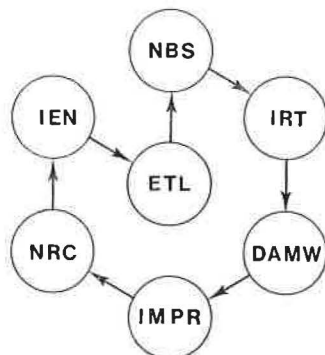


Fig. 1

Avant les mesures comparatives, le premier problème à résoudre était celui de la compatibilité des connecteurs. Le laboratoire pilote proposa d'utiliser le connecteur de guide d'onde à 10 GHz, de référence japonaise BRJ-10 (fig. 2). Tous les laboratoires participants donnèrent leur accord sur cette proposition.

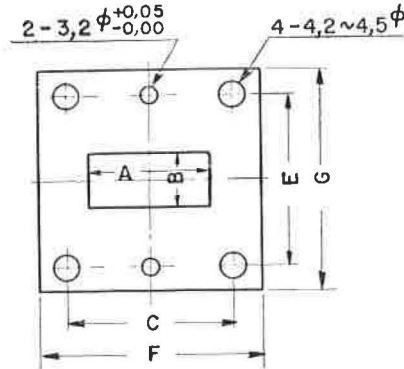


Fig. 2.- Connecteur de guide d'onde à 10 GHz (référence japonaise BRJ-10).

A = $22,9 \pm 0,04$; B = $10,2 \pm 0,04$; C = 31,0 ; E = 32,5 ;
 F = 42,0 ; G = 42,0 (Cotes en millimètres).

Deux à quatre étalons voyageurs ont été proposés par chacun des quatre laboratoires E.T.L., N.B.S., I.R.T. et I.M.P.R. (tableau I). La plupart des étalons étaient des montures bolométriques ; les étalons de l'I.R.T. étaient du type à circulation d'air. La participation du D.A.M.W., du N.R.C. et de l'I.E.N. se limitait à effectuer des mesures sur les étalons fournis par les autres laboratoires.

TABLEAU I

Étalons voyageurs

Laboratoires	Étalons	Types			
E.T.L.	$\left\{ \begin{array}{l} \text{ETL } 10-1\text{F} \\ \text{ETL } 10-2\text{F} \end{array} \right\}$	Monture bolométrique à film			
			$\left\{ \begin{array}{l} \text{ETL } 10-3\text{B} \\ \text{ETL } 10-4\text{B} \end{array} \right\}$	Monture bolométrique à coefficient de température positif	
	N.B.S.	$\left\{ \begin{array}{l} \text{NBS } 9001 \\ \text{NBS } 9002 \end{array} \right\}$			Id.
			I.M.P.R.	$\left\{ \begin{array}{l} \text{IMPR } \text{N}4 \\ \text{IMPR } \text{N}5 \\ \text{IMPR } \text{N}6 \end{array} \right\}$	
I.R.T.	$\left\{ \begin{array}{l} \text{IRT } 805858 \\ \text{IRT } 805863 \end{array} \right\}$	Wattmètre à circulation d'air			

Lorsque les étalons voyageurs rassemblés par l'E.T.L. furent contrôlés avant leur circulation, deux d'entre eux, NBS 9002 et IMPR N4, se révélèrent défectueux. Pour le NBS 9002, une partie de la paroi du guide d'onde était arrachée ; il a été réparé selon les instructions du N.B.S. Après examen approfondi on a décidé d'exclure l'étalon IMPR N4 de la comparaison et de le renvoyer à l'I.M.P.R.

Les mesures comparatives débutèrent en juin 1966 et s'achevèrent en décembre 1971. Le tableau II donne les dates d'arrivée et de départ des étalons dans les laboratoires participants, ainsi que l'état des étalons. Un cercle indique que l'étalon était en état de marche et fut mesuré par le laboratoire concerné. Une croix indique qu'on a trouvé l'étalon cassé à son arrivée au laboratoire et un triangle que l'étalon était perdu.

Le tableau III, dans lequel les laboratoires sont rangés dans l'ordre de circulation, donne les résultats des mesures. Les valeurs données sont les efficacités réelles en pour cent des étalons voyageurs, sauf dans le cas de l'I.R.T. et du D.A.M.W. ; pour ces deux laboratoires les valeurs sont les rapports, en pour cent, des efficacités réelles des étalons voyageurs aux efficacités réelles (inconnues) de l'étalon IRT 805858 et de l'étalon local du D.A.M.W. respectivement. Il est assez difficile de donner une évaluation statistique des résultats des mesures sur les étalons primaires de chaque pays dans le tableau III, parce que la plupart des étalons voyageurs ont eu des défaillances au cours du circuit de mesures et que seulement trois étalons ont été mesurés par tous les participants. Toutefois, la moyenne des résultats obtenus par l'E.T.L., le N.B.S., l'I.M.P.R., le N.R.C. et l'I.E.N. pour ces trois étalons est donnée dans la dernière colonne du tableau III. L'écart moyen et la variance sont indiqués dans la dernière et l'avant-dernière lignes. En utilisant les valeurs moyennes obtenues pour les étalons ETL 10-3B, NBS 9001 et NBS 9002 et les résultats de l'I.R.T. et du D.A.M.W., on a calculé que l'efficacité réelle de l'étalon IRT 805858 et celle de l'étalon du D.A.M.W. étaient respectivement 99,6 % et 96,2 %. On a obtenu les efficacités réelles en multipliant les résultats de l'I.R.T. et du D.A.M.W. respectivement par 0,996 et 0,962 et on les a introduites dans le tableau IV en même temps que les autres chiffres pris dans le tableau III.

Cette première comparaison internationale des faibles puissances à 10 GHz a été achevée avec la coopération des laboratoi-

TABLEAU II

Laboratoires	E.T.L. (I)	N.B.S.	I.R.T.	D.A.M.W.	I.M.P.R.	N.R.C.	I.E.N.	E.T.L. (II)
	Dates { Arrivée	Juin 66	Sept. 66	Juin 67	Oct. 68	Janv. 69	Nov. 70	Fév. 71
{ Départ	Août 66	Mai 67	Août 68	Janv. 69	(Juil. 70)	(Déc. 70)	Juin 71	Déc. 71

Etalons

ETL 10-1F	0	0	0	X	X	X	X	X
ETL 10-2F	0	0	0	0	X	X	X	X
ETL 10-3B	0	0	0	0	0	0	0	0
ETL 10-4B	0	0	0	0	0	X	X	X
NBS 9001	0	0	0	0	0	0	0	0
NBS 9002	0	0	0	0	0	0	0	0
IMPR N5	0	0	0	0	Δ	Δ	Δ	Δ
IMPR N6	0	0	0	0	Δ	Δ	Δ	Δ
IRT 805858	0	0	0	0	0	0	X	X
IRT 805863	0	0	0	0	0	X	X	X

0 Utilisable Δ Perdu X Cassé

TABLEAU III

Résultats des mesures de chaque laboratoire

Efficacités réelles (en pour cent)

Etalons	ETL(I)	NBS	IRT*	DAMW*	IMPR	NRC	IEN	ETL(II)	Moyenne
ETL 10-1F	99,49	99,57	98,64						
ETL 10-2F	99,50	99,69	98,73	104,0					
ETL 10-3B	98,96	99,00	97,70	103,1	98,4	99,1	99,14	99,02	98,94
ETL 10-4B	99,35	99,23	98,26	103,4	98,3				
NBS 9001	99,05	99,02	98,58	101,4	99,0	99,0	98,86	98,70	98,94
NBS 9002	98,91	98,85	98,37	103,5	99,1	98,7	98,65	98,70	98,82
IMPR N5	95,28	97,17	95,98	102,6	95,6				
IMPR N6	100,64	99,66	99,98	102,9	98,2				
IRT 805858	98,92	99,87		102,1		100,0			
IRT 805863	94,44	99,66	99,83	103,6					
Ecart moyen	0,07	0,06			- 0,07	0,03	- 0,02	- 0,09	
Variance	0,0023	0,0006			0,1802	0,0202	0,0373	0,0262	

* Les valeurs indiquées sont les rapports des efficacités réelles à celle (inconnue) de l'étalon du laboratoire local concerné.

TABLEAU IV

Efficacités réelles des étalons voyageurs
(en pour cent)

Etalons	Laboratoires								Moyenne
	ETL(I)	NBS	IRT	DAMW	IMPR	NRC	IEN	ETL(II)	
ETL 10-1F	99,49	99,57	98,25						99,11
ETL 10-2F	99,50	99,69	98,34	100,1					99,41
ETL 10-3B	98,96	99,00	97,31	99,2	98,4	99,1	99,14	99,02	98,77
ETL 10-4B	99,35	99,23	97,87	99,5	98,3				98,85
NBS 9001	99,05	99,02	98,19	97,6	99,0	99,0	98,86	98,70	98,68
NBS 9002	98,91	98,85	97,98	99,6	99,1	98,7	98,65	98,70	98,81
IMPR N5	95,28	97,17	95,60	98,7	95,6				96,48
IMPR N6	100,64	99,66	99,58	99,0	98,2				99,42
IRT 805858	98,92	99,87	99,60	98,2		100,0			99,32
IRT 805863	94,44	99,66	99,43	99,7					98,33
Ecart moyen	+ 0,22	+ 0,20	- 0,93	+ 0,03	+ 0,05	+ 0,18	+ 0,13	+ 0,05	
Variance	0,0189	0,0231	0,2423	0,9845	0,1521	0,0631	0,0721	0,0333	

res participants et nous a fourni quelques enseignements appréciables.

Le laboratoire pilote aimerait faire quelques suggestions pour les futures comparaisons internationales. L'une concerne les étalons voyageurs. Dans notre cas, seuls trois étalons sur dix sont restés en état de marche au cours de tout le cycle de mesures. Nous suggérons que soient mis au point des étalons voyageurs plus robustes et que les étalons soient manipulés avec plus de soins. Une autre suggestion concerne le mode de circulation. Avec la méthode utilisée il a fallu plus de cinq ans pour terminer la comparaison. La lenteur de la circulation est due essentiellement aux problèmes douaniers dans tous les pays. Plus la comparaison dure, plus il y a d'occasions de défaillance des étalons voyageurs. Par conséquent, une comparaison du type "en étoile" semble préférable à une comparaison par "permutation circulaire", méthode qui a été employée pour cette comparaison internationale.

(Octobre 1972)

BIBLIOGRAPHIE

1. (E.T.L.)- SAKURAI (K.), Microwave power standard, *Res. of the E.T.L.* No. 680, Dec. 1967.
 2. (N.B.S.)- ENGEN (G.F.), A refined X-band microwave microcalorimeter, *J. Res. N.B.S.*, 63-C, No. 1, July-Sep. 1959.
 3. (N.B.S.)- DESCH (R.F.) and LARSON (R.E.), Bolometric microwave power calibration techniques at the National Bureau of Standards, *I.E.E.E. Trans.*, IM-12, No. 1, June 1963.
 4. (I.E.N.)- GIACHINO (G.) and ZITO (G.), Campione primario di potenza nel campo delle iperfrequenze, *Elettronica*, 19, No. 1, 1970.
 5. (I.R.T.)- ACS (E.), A proposed method of microwave power measurement, *Proc. I.E.E.E.*, 109, Part B, Suppl. No. 23, 1962.
-

Comparaison internationale de l'affaiblissement en coaxial au-dessous de 8 GHz (*)

Par R. W. YELL

National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

(Traduction du Document GT-RF/72-6)

I. A sa réunion en 1968, le "Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences" du C.C.E. avait recommandé que soit entreprise une comparaison internationale d'affaiblissement en coaxial à des fréquences jusqu'à 8 GHz ; le N.P.L. (Royaume-Uni) avait accepté d'en être le laboratoire pilote. Sur les six pays qui exprimèrent leur intérêt pour cette comparaison, quatre y participèrent effectivement : N.B.S. (Etats-Unis), N.R.C. (Canada), Royal Institute for National Defence (R.I.N.D., Suède) et N.P.L. (Royaume-Uni).

En réponse à une première lettre adressée aux participants en juillet 1969, les propositions suivantes furent acceptées pour la comparaison :

TABLEAU 1

Fréquences pour les mesures (en GHz) : 0,5 2,0 4,0 7,5

Affaiblissement (valeurs nominales en dB) : 6 10 20 30 60

Étalons voyageurs : Fournis par le laboratoire pilote en deux séries de cinq affaiblisseurs (lignes GPC-14 avec leurs connecteurs). Le N.B.S. a fourni deux affaiblisseurs de 3 dB et deux de 50 dB équipés de connecteurs "Precision-N" et prévus pour des mesures jusqu'à 2 GHz ; ces quatre affaiblisseurs faisaient également partie des étalons voyageurs.

(*) Ce rapport, présenté comme rapport provisoire au "Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences", est devenu le rapport définitif.

Le début de la comparaison, prévu à l'origine pour le mois de décembre 1970, fut retardé jusqu'en avril 1971 à cause de l'arrivée tardive des étalons voyageurs de 14 mm. Après un étalonnage initial au N.P.L., les étalons ont effectué le circuit

NPL → NRC → NBS → RIND → NPL.

1a. *Affaiblisseurs voyageurs*

Pendant la préparation de cette comparaison, des affaiblisseurs fixes équipés avec des connecteurs GPC-14, capables d'assurer la plus grande reproductibilité des pertes d'insertion, devinrent disponibles commercialement. On se procura deux séries d'affaiblisseurs, avec les valeurs nominales d'affaiblissement indiquées plus haut et des taux d'ondes stationnaires (TOS, en anglais VSWR) inférieurs à 1,05 ($|\Gamma| = 0,024$).

On a choisi les caractéristiques des étalons pour qu'elles s'adaptent à celles d'un réflectomètre qui utilise comme référence une charge ajustable de précision, le système ayant une résolution de $|\Gamma| = 0,001$ (TOS = 1,002) et une exactitude de $|\Gamma| = 0,0025$ (TOS = 1,005): Ces mesures sont données au tableau 2 pour les fréquences se rapportant à cette comparaison. On n'a observé aucune variation significative de TOS pour une variation de fréquence de ± 5 MHz autour de la fréquence nominale. Les étalons voyageurs étaient accompagnés de deux affaiblisseurs tampons de 10 dB (TOS < 1,01) et d'une ligne de précision de 100 mm (TOS < 1,006). Il était indiqué que les mesures devaient être faites entre les affaiblisseurs tampons et par comparaison avec la ligne de 100 mm, cela pour éviter des déplacements excessifs dans le circuit de mesure. Ce montage est représenté sur la figure 1. Ces composants et les étalons voyageurs comportaient un code de couleur sur les connecteurs pour que les connections soient toujours faites dans le même ordre.

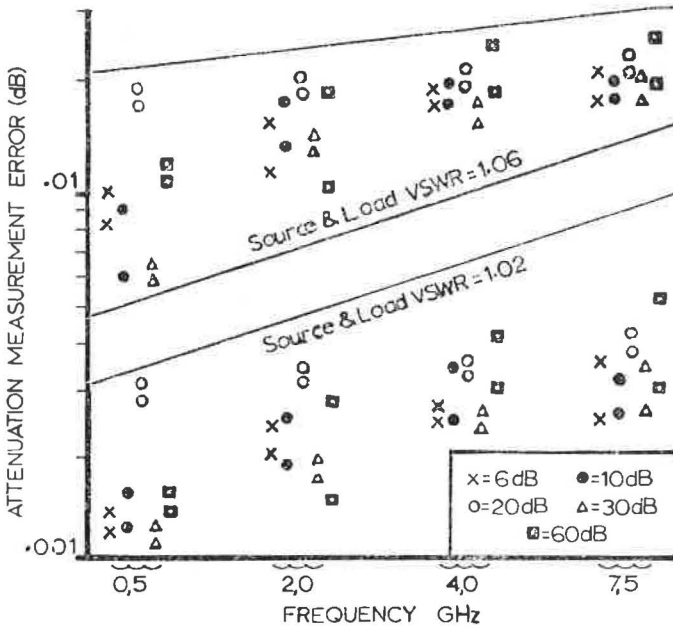
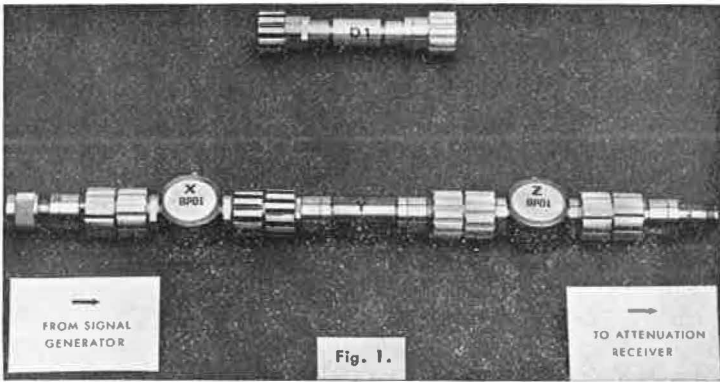


Fig. 2.

TABLEAU 2

Taux d'onde stationnaire (TOS) des affaiblisseurs voyageurs

Affaiblissement (valeur nominale en dB)	N° de Série	Fréquence (en GHz)				
		0,5	2,0	4,0	7,5	
		TOS				
Affaiblisseurs de 14 mm	6	376	1,004	1,008	1,012	1,025
	6	417	1,005	1,009	1,014	1,012
	10	551	1,003	1,012	1,020	1,020
	10	560	1,005	1,007	1,012	1,010
	20	1	1,017	1,019	1,022	1,030
	20	2	1,016*	1,020*	1,020*	1,025
	30	1	1,003	1,008	1,008	1,024
	30	2	1,003	1,007	1,007	1,014
	60	1	1,008	1,006	1,006	1,016*
60	2	1,006	1,015	1,015	1,044	
Affaiblisseurs "Precision-N"	3	H1065	1,06	1,07		
	3	H1083	1,07	1,07		
	50	H1296	1,06	1,10		
	50	H1297	1,03	1,08		

1b. Estimation des incertitudes

La limite inférieure de l'incertitude sur l'affaiblissement que l'on peut espérer atteindre dans cette comparaison, mise à part toute considération d'erreurs systématiques et aléatoires, est due aux interactions par mauvaise adaptation de la source, de la charge et des affaiblisseurs voyageurs. On peut calculer l'erreur correspondante d'après l'équation suivante :

$$\Delta A = 8,686 \frac{S_t - 1}{S_t + 1} \left[2 \frac{S_a - 1}{S_a + 1} + \frac{S_t - 1}{S_t + 1} \left\{ 1 + \frac{1}{\text{antilog}_{10}(A/10)} \right\} \right] \text{dB}$$

où ΔA = Erreur sur l'affaiblissement (en dB)

A = Affaiblissement de l'étalon étudié (en dB)

S_a = TOS de l'affaiblisseur

S_t = TOS de la source et de la charge.

Les résultats sont donnés à la figure 2 en admettant que les TOS de la source et de la charge peuvent être réduits simultanément à 1,02 ou 1,06. Le schéma donne donc les possibi-

lités de ces affaiblisseurs pour la comparaison des mesures d'affaiblissement.

1c. *Emballage*

On a emballé tous les affaiblisseurs dans un même coffret pourvu d'alvéoles à leur dimension dans une mousse de plastique ferme et élastique. Ce coffret était emballé dans une seconde boîte extérieure, également sur des supports élastiques.

1d. *Circulation*

Les affaiblisseurs ont quitté le laboratoire pilote en avril 1971 et y sont revenus en août 1972, après avoir effectué le circuit NPL → NRC → NBS → RIND → NPL.

II. A leur retour, les affaiblisseurs ont fait l'objet d'un examen physique ; on a redéterminé complètement leur TOS et mesuré à nouveau, dans toute la mesure du possible, la perte d'insertion.

2a. *Condition physique*

Tous les connecteurs des affaiblisseurs étaient très sales, en particulier la face active du contact extérieur ; cela a dû nuire à la répétabilité de la perte d'insertion. C'est une caractéristique particulière de ce connecteur qu'il n'y a aucun glissement ni rotation de la face extérieure lors du branchement ; il n'y a de ce fait aucune action d'auto-nettoyage.

Plusieurs connecteurs ont subi des détériorations ; en particulier le connecteur à l'extrémité codée en bleu des affaiblisseurs tampons présentait une grosse entaille soulevée dans la face terminale du contact extérieur ; cela a presque certainement entraîné des détériorations sur les connecteurs des affaiblisseurs, car ce connecteur était utilisé dans toutes les mesures.

L'anneau de serrage sur l'affaiblisseur tampon codé en rouge présentait des marques d'arrachage qui avaient entamé le revêtement extérieur et laissaient à nu le métal de base de l'anneau de serrage. On a trouvé que l'affaiblisseur voyageur C2 (20 dB) se dévissait du corps à l'extrémité codée en rouge : il peut y avoir un lien entre cela et les marques d'arrachage dont il a été question plus haut.

Il manquait un segment du contact central en étoile de l'un des affaiblisseurs voyageurs.

2b. Redétermination du TOS

On a remesuré le TOS sur le réflectomètre qui avait été employé au commencement de la comparaison. Dans bien des cas (après nettoyage et réparation des connecteurs) les nouvelles mesures donnèrent des résultats identiques aux résultats initiaux dans les limites de résolution de l'appareillage ($|\Gamma| = 0,001$). On a observé des variations notables pour les affaiblisseurs C2 (20 dB N° 2) et E1 (60 dB N° 1). Les variations sont indiquées par le signe (*) dans le tableau 2. Ces variations n'étaient pas suffisantes pour perturber la comparaison.

Appareillage de mesure d'affaiblissement

Les appareillages de mesure d'affaiblissement utilisés dans tous les laboratoires reposaient sur le principe du changement de fréquence superhétérodyne, dans lequel les variations de puissance en hyperfréquence dues à l'insertion de l'affaiblisseur sont reproduites à une fréquence intermédiaire et comparées avec un étalon de référence à cette fréquence. Dans la plupart des cas, l'étalon de référence était un affaiblisseur à guide d'ondes au-delà de la fréquence de coupure [WBCO] fonctionnant à 30 MHz, à l'exception du N.R.C. qui utilisait un transformateur de précision à rapport variable [IFTR] fonctionnant à 10 kHz.

Les exactitudes données par les laboratoires sont les suivantes :

NRC	0,0005 dB/10 dB	10 kHz IFTR
NBS	0,005 dB/10 dB	30 MHz WBCO
RIND	0,005 dB/10 dB + 0,03 dB	30 MHz WBCO
NPL	0,005 dB/10 dB	30 MHz WBCO

Résultats des mesures d'affaiblissement

Les valeurs déterminées par chaque laboratoire sont données aux tableaux 3 à 7, avec les écarts-types des résultats et l'erreur systématique de l'appareillage.

Si l'on prend les valeurs moyennes et si l'on prévoit une erreur maximale en plus ou en moins en ajoutant la fonction convenable de l'écart-type à l'erreur systématique, on obtient une série de résultats qui sont dans la plupart des cas cohérents. Les principales exceptions concernent les affaiblisseurs qui ont apparemment varié (C2 20 dB N° 2) ou qui ont été

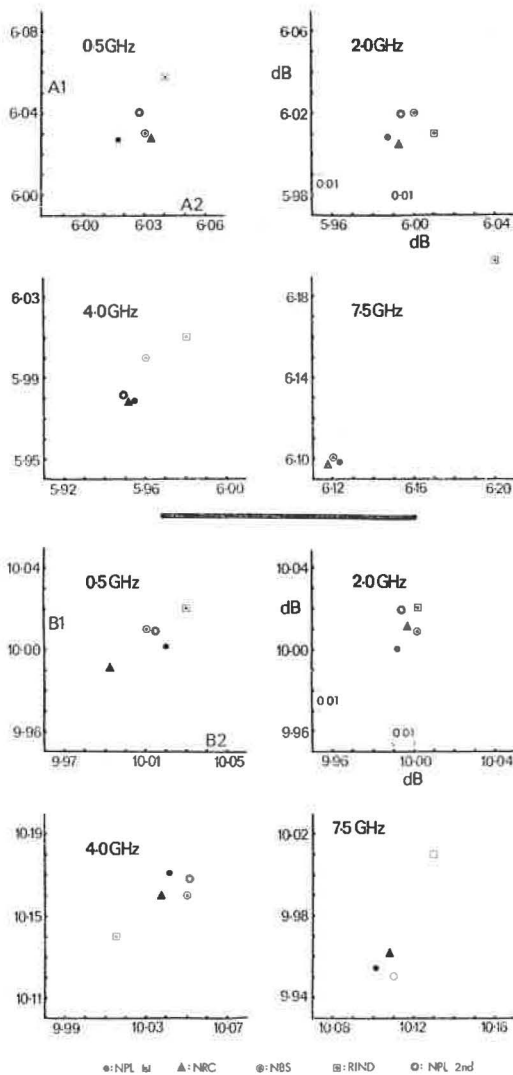


Fig. 3. — Affaiblisseurs de 6 dB et 10 dB.

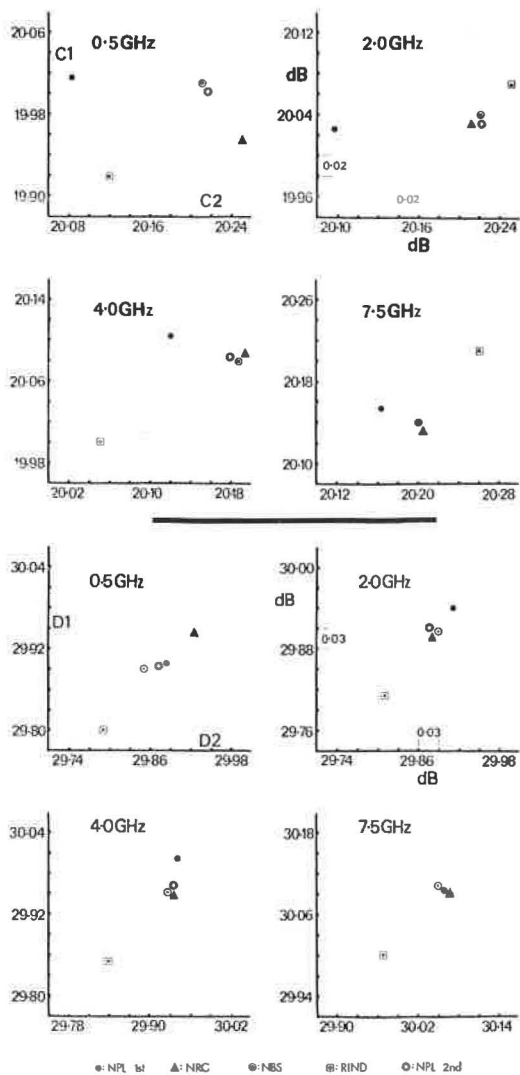


Fig. 4. — Affaiblisseurs de 20 dB et 30 dB.

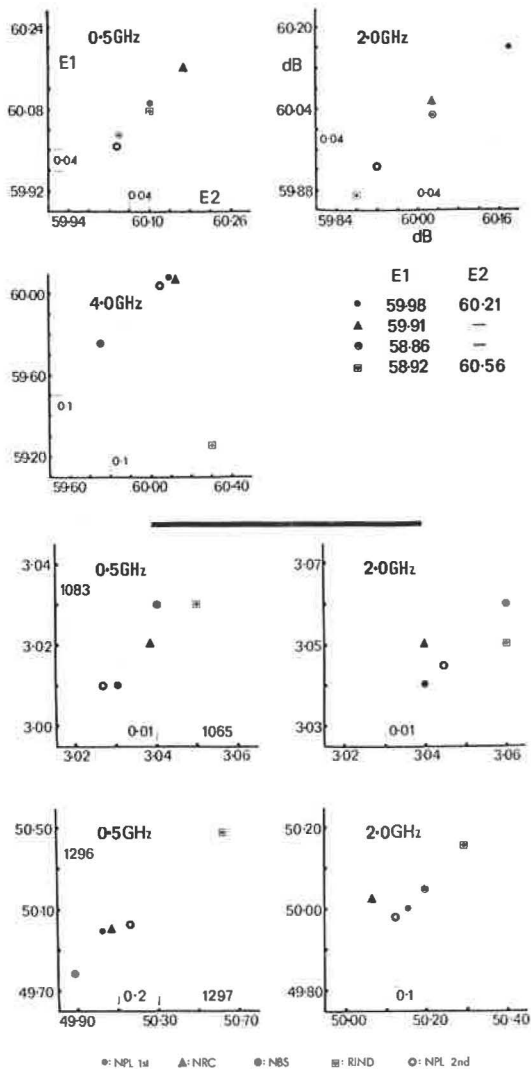


Fig. 5. — Affaiblisseurs de 3 dB, 50 dB et 60 dB.

signalés comme instables (60 dB N° 2). La présentation de ces résultats est assez difficile. Nous avons toutefois adopté la représentation graphique dans laquelle la valeur moyenne pour un instrument est représentée en fonction de celle du second, les deux instruments ayant des affaiblissements voisins (fig. 3, 4 et 5). Dans plusieurs cas l'accord est bien bon, de l'ordre de 0,01 dB/10 dB. La variation de la valeur de l'affaiblisseur C2 (20 dB N° 2) est manifeste d'après la première et la deuxième mesures du N.P.L.

Conclusions

On laisse aux laboratoires le soin de tirer leurs propres conclusions pour ce qui est des mesures d'affaiblissement. Toutefois, quelques commentaires en ce qui concerne la comparaison peuvent être utiles.

a) Quelques-unes des variations et des incertitudes constatées dans les mesures étaient sans doute dues à une certaine instabilité dans les étalons voyageurs ; il faut par conséquent mettre au point des instruments qui conviennent mieux pour de futures comparaisons internationales de ce genre.

b) Une permutation circulaire des étalons n'est peut-être pas la meilleure méthode d'organisation des comparaisons, car cela laisse aux laboratoires participants une lourde responsabilité quant au maintien en bon état des connecteurs. Une distribution radiale à partir du laboratoire pilote pourrait éviter ce problème.

c) C'était une comparaison sur une grande échelle (quatre fréquences et quatorze affaiblisseurs); elle a constitué une lourde charge pour chaque participant. Une comparaison sur une plus petite échelle aurait peut-être eu une meilleure chance de succès.

Nos remerciements vont à chaque participant pour leur aide qui a permis de mener à bien cette comparaison.

Les tableaux 3 à 7 qui suivent sont la reproduction des tableaux qui figurent dans le document original en anglais (Document GT-RF/76-6).

Attenuator : Affaiblisseur
Amean : Valeur moyenne de l'affaiblissement
 σ : Ecart-type
S.E. : Incertitude systématique
N : Nombre de mesures

TABLEAU 3

Valeurs mesurées au N.P.L. avant circulation

a) Fréquence : 0,5 GHz \pm 1,0 MHz
 Température ambiante : 22 \pm 0,5 °C

Attenuator		Amean(dB)	σ (dB)	S.E.(dB)	N
A1	GR 6dB No.376	6.027	0.003	0.006	13
A2	GR 6dB No.417	6.018	0.003	0.006	13
B1	GR 10dB No.551	10.009	0.003	0.008	11
B2	GR 10dB No.560	10.018	0.005	0.008	12
C1	Narda 20dB No.1	20.017	0.008	0.013	12
C2	Narda 20dB No.2	20.08	0.008	0.013	12
D1	Narda 30dB No.1	29.897	0.006	0.018	14
D2	Narda 30dB No.2	29.882	0.007	0.018	12
E1	Narda 60dB No.1	60.09	0.010	0.033	12
E2	Narda 60dB No.2	60.10	0.012	0.033	12
Weinschel	3dB H1065	3.03	0.002	0.005	10
Weinschel	3dB H1083	3.01	0.005	0.005	10
Weinschel	50dB H1296	50.00	0.004	0.028	10
Weinschel	50dB H1297	50.03	0.005	0.028	10

b) Fréquence : 2,0 GHz \pm 1,0 MHz
 Température ambiante : 22 \pm 0,5 °C

Attenuator		Amean(dB)	σ (dB)	S.E.(dB)	N
A1		6.008	0.004	0.007	11
A2		5.988	0.004	0.007	20
B1		10.001	0.002	0.009	18
B2		9.991	0.003	0.009	18
C1		20.027	0.005	0.014	10
C2		20.077	0.005	0.014	10
D1		29.94	0.004	0.019	12
D2		29.91	0.002	0.019	12
E1		60.16	0.008	0.034	14
E2		60.18	0.008	0.034	14
H1065		3.04	0.005	0.007	10
H1083		3.04	0.002	0.007	10
H1296		50.00	0.005	0.030	10
H1297		50.16	0.005	0.030	10

TABLEAU 3 (suite)

- c) Fréquence : 4,0 GHz \pm 1,0 MHz
 Température ambiante : 22 \pm 0,5 °C

Attenuator	Amean(dB)	σ (dB)	S.E.(dB)	N
A1	5.979	0.004	0.007	10
A2	5.954	0.006	0.007	10
B1	10.171	0.008	0.009	10
B2	10.041	0.004	0.009	10
C1	20.106	0.004	0.014	12
C2	20.120	0.004	0.014	12
D1	30.01	0.006	0.019	12
D2	29.94	0.003	0.019	12
E1	60.08	0.006	0.034	12
E2	60.10	0.003	0.035	12

- d) Fréquence : 7,5 GHz \pm 1,0 MHz
 Température ambiante : 22 \pm 0,5 °C

Attenuator	Amean(dB)	σ (dB)	S.E.(dB)	N
A1	6.095	0.005	0.007	10
A2	6.130	0.004	0.007	10
B1	9.954	0.004	0.009	12
B2	10.101	0.003	0.009	10
C1	20.163	0.008	0.014	12
C2	20.161	0.007	0.014	12
D1	30.096	0.002	0.019	10
D2	30.056	0.004	0.019	10
E1	59.98	0.007	0.034	10
E2	60.21	0.020	0.036	20

TABLEAU 4

Valeurs mesurées au N.R.C.

- a) Fréquence : 0,5 GHz \pm 0,1 MHz
 Température : 23 °C \pm 0,1 °C

Attenuator	Amean (dB)	σ (dB)	S.E. (dB)	N
A1 GR 6dB No. 376	6.029	0.0008	0.005	10
A2 GR 6dB No. 417	6.033	0.0014	0.005	10
B1 GR 10dB No. 551	9.992	0.0014	0.005	10
B2 GR 10dB No. 560	9.992	0.0017	0.005	10
C1 Narda 20dB No. 1	20.017	0.0024	0.005	10
C2 Narda 20dB No. 1	20.08	0.0026	0.005	10
D1 Narda 30dB No. 1	29.944	0.0032	0.005	10
D2 Narda 30dB No. 2	29.926	0.0026	0.005	10
E1 Narda 60dB No. 1	60.161	0.006	0.02	10
E2 Narda 60dB No. 2	60.170	0.006	0.02	10
Weinschel 3dB H1065	3.039	0.0014	0.005	10
Weinschel 3dB H1083	3.022	0.0020	0.005	10
Weinschel 50dB H1296	50.002	0.0026	0.01	10
Weinschel 50dB H1297	50.063	0.0036	0.01	10

- b) Fréquence : 2,0 GHz \pm 0,1 MHz
 Température : 23 \pm 1 °C

Attenuator	Amean (dB)	σ (dB)	S.E. (dB)	N
A1	6.0061	0.0004	0.0005	10
A2	5.9942	0.0005	0.0005	10
B1	10.0120	0.0007	0.0005	10
B2	9.9990	0.0010	0.0005	10
C1	20.0330	0.0008	0.001	10
C2	20.2110	0.0008	0.001	10
D1	29.8990	0.0007	0.002	10
D2	29.8805	0.0006	0.002	10
E1	60.056	0.0020	0.01	10
E2	60.036	0.0033	0.01	10
H1065	3.0834	0.0012	0.005	10
H1083	3.0522	0.0007	0.005	10
H1296	50.037	0.0010	0.01	10
H1297	50.191	0.0008	0.01	10

TABLEAU 4 (suite)

c) Fréquence : 4,0 GHz \pm 0,1 MHzTempérature : 23 \pm 1 °C

Attenuator	Amean(dB)	σ (dB)	S.E.(dB)	N
A1	5.9792	0.0017	0.0005	10
A2	5.9509	0.0008	0.0005	10
B1	10.1601	0.0014	0.0005	10
B2	10.0393	0.0008	0.0005	10
G1	20.086	0.0021	0.001	10
G2	20.193	0.0016	0.001	10
D1	29.954	0.0015	0.001	10
D2	29.933	0.0012	0.001	10
E1	60.100	0.0025	0.003	11
E2	60.121	0.0021	0.003	10

d) Fréquence : 7,5 GHz \pm 0,1 MHzTempérature : 23 \pm 1 °C

Attenuator	Amean(dB)	σ (dB)	S.E.(dB)	N
A1	6.0954	0.0033	0.0005	20
A2	6.1163	0.0067	0.0005	10
B1	9.9628	0.0022	0.0005	10
B2	10.1087	0.0023	0.0005	10
G1	20.132	0.0076	0.001	10
G2	20.201	0.0030	0.001	10
D1	30.098	0.0012	0.001	10
D2	30.065	0.0025	0.001	14
E1	59.91	0.024	0.003	10
E2	—	—	—	—

TABLEAU 5

Valeurs mesurées au N.B.S.

a) Fréquence : 0,5 GHz (exactitude : 1×10^{-6})
Température : 23 °C

	Attenuator	A _{mean} (dB)	σ (dB)	S.E.(dB)	N
A1	GR 6dB No.376	6.03	0.002	0.03	-
A2	GR 6dB No.417	6.03	0.002	0.03	-
B1	GR 10dB No.551	10.01	0.002	0.03	-
B2	GR 10dB No.560	10.01	0.001	0.03	-
C1	Narda 20dB No.1	20.01	0.001	0.04	-
C2	Narda 20dB No.2	20.21	0.008	0.04	-
D1	Narda 30dB No.1	29.89	0.001	0.06	-
D2	Narda 30dB No.2	29.85	0.002	0.06	-
E1	Narda 60dB No.1	60.03	0.002	0.20	-
E2	Narda 60dB No.2	60.04	0.003	0.20	-
Weinschel	3dB No.H1065	3.04	0.003	0.03	-
Weinschel	3dB No.H1083	3.03	0.002	0.03	-
Weinschel	50dB No.H1296	49.79	0.002	0.15	-
Weinschel	50dB No.H1297	49.86	0.003	0.15	-

b) Fréquence : 2,0 GHz
Température : 23 °C

	Attenuator	A _{mean} (dB)	σ (dB)	S.E.(dB)	N
A1		6.02	0.003	0.03	-
A2		6.00	0.003	0.03	-
B1		10.01	0.002	0.03	-
B2		10.00	0.002	0.03	-
C1		20.04	0.004	0.04	-
C2		22.22	0.002	0.04	-
D1		29.90	0.001	0.06	-
D2		29.88	0.001	0.06	-
E1		60.02	0.005	0.20	-
E2		60.03	0.002	0.20	-
H1065		3.10	0.001	0.03	-
H1083		3.06	0.004	0.03	-
H1296		50.05	0.005	0.15	-
H1297		50.19	0.006	0.15	-

TABLEAU 5 (suite)

c) Fréquence : 4,0 GHz

Température : 23 °C

Attenuator	Amean(dB)	σ (dB)	S.E.(dB)	N
A1	6.00	0.004	0.03	-
A2	5.96	0.007	0.03	-
B1	10.16	0.004	0.03	-
B2	10.05	0.003	0.03	-
C1	20.08	0.002	0.04	-
C2	20.19	0.002	0.04	-
D1	29.95	0.003	0.06	-
D2	29.93	0.003	0.06	-
E1	59.75	0.010	0.20	-
E2	59.76	0.004	0.20	-

d) Fréquence : 7,5 GHz

Température : 23 °C

Attenuator	Amean(dB)	σ (dB)	S.E.(dB)	N
A1	6.10	0.009	0.03	-
A2	6.12	0.004	0.03	-
B1	9.95	0.004	0.03	-
B2	10.11	0.006	0.03	-
C1	20.14	0.006	0.04	-
C2	20.20	0.002	0.04	-
D1	30.10	0.004	0.06	-
D2	30.05	0.005	0.06	-
E1	58.86	0.008	0.20	-
E2	-	-	-	-

TABLEAU 6

Valeurs mesurées au R.I.N.D.

a) Fréquence : 0,5 GHz

Attenuator	Amean (dB)	σ (dB)	S.E. (dB)	N
A1 GR 6dB No. B76	6,054	0,0081	0,035	5
A2 GR 6dB No. 417	6,04	0,0017	0,035	6
B1 GR 10 dB No. 551	10,02	0,0048	0,035	11
B2 GR 10dB No. 560	10,03	0,0055	0,035	11
C1 Narda 20dB No. 1	19,92	0,0035	0,040	10
C2 Narda 20dB No. 2	20,12	0,0039	0,040	11
D1 Narda 30dB No. 1	29,80	0,0074	0,045	12
D2 Narda 30dB No. 2	29,79	0,0031	0,045	13
E1 Narda 60dB No. 1	60,08	0,0039	0,060	13
E2 Narda 60dB No. 2	60,10	0,0066	0,060	14
Weinschel 3dB No. H1065	3,05	0,0028	0,035	11
Weinschel 3dB No. H1083	3,03	0,0038	0,035	12
Weinschel 50dB No. H1296	50,48	0,0099	0,055	13
Weinschel 50dB No. H1297	50,62	0,0024	0,055	11

b) Fréquence : 2,0 GHz

Attenuator	Amean (dB)	σ (dB)	S.E. (dB)	N
A1	6,01	0,0023	0,035	8
A2	6,01	0,0045	0,035	10
B1	10,02	0,0085	0,035	12
B2	10,02	0,0055	0,035	12
C1	20,07	0,0045	0,040	11
C2	20,25	0,0024	0,040	11
D1	29,81	0,0038	0,045	10
D2	29,81	0,0049	0,045	13
E1	59,87	0,0103	0,060	11
E2	59,88	0,0042	0,060	13
H1065	3,10	0,0025	0,035	11
H1083	3,05	0,0050	0,035	11
H1296	50,16	0,0138	0,055	10
H1297	50,29	0,0066	0,055	11

TABLEAU 6 (suite)

c) Fréquence : 4,0 GHz

Attenuator	Amean (dB)	σ (dB)	S.E. (dB)	N
A1	6,01	0,0084	0,035	10
A2	5,98	0,0044	0,035	10
B1	10,14	0,005	0,035	13
B2	10,01	0,005	0,035	8
C1	20,00	0,010	0,040	12
C2	20,05	0,008	0,040	15
D1	29,85	0,008	0,045	12
D2	29,84	0,003	0,045	13
E1	59,26	0,010	0,060	10
E2	60,30	0,011	0,060	11

d) Fréquence : 7,5 GHz

Attenuator	Amean (dB)	σ (dB)	S.E. (dB)	N
A1	6,21	0,011	0,035	11
A2	6,19	0,029	0,035	13
B1	10,01	0,008	0,035	13
B2	10,13	0,021	0,035	12
C1	20,23	0,025	0,040	14
C2	20,26	0,017	0,040	14
D1	30,00	0,008	0,045	9
D2	29,97	0,010	0,045	9
E1	58,92	0,041	0,060	10
E2	60,50	0,044	0,060	9

TABLEAU 7

Valeurs mesurées au N.P.L. à la fin de la circulation

a) Fréquence : 0,5 GHz ± 1,0 MHz

Température : 23 °C ± 0,5 °C

Attenuator	A _{mean} (dB)	σ (dB)	S.E. (dB)	N
A1 GR 6dB No. 376	6,045	0,005	0,006	5
A2 GR 6dB No. 417	6,035	0,002	0,006	6
B1 GR 10dB No. 551	10,008	0,002	0,008	6
B2 GR 10dB No. 560	10,012	0,002	0,008	6
C1 Narda 20dB No. 1	19,992	0,003	0,0013	6
C2 Narda 20dB No. 2	20,212	0,003	0,0013	6
D1 Narda 30dB No. 1	29,890	0,004	0,018	6
D2 Narda 30dB No. 2	29,850	0,003	0,018	6
E1 Narda 60dB No. 1	60,01	0,006	0,033	6
E2 Narda 60dB No. 2	60,04	0,004	0,033	6
Weinschel 3dB H1065	3,025	0,002	0,005	6
Weinschel 3dB H1083	3,013	0,002	0,005	6
Weinschel 50dB H1296	49,95	0,003	0,028	6
Weinschel 50dB H1297	50,03	0,005	0,028	6

b) Fréquence : 2,0 GHz ± 1,0 MHz

Température : 23 ± 0,5 °C

Attenuator	A _{mean} (dB)	σ (dB)	S.E. (dB)	N
A1	6,025	0,003	0,007	6
A2	6,002	0,003	0,007	6
B1	10,025	0,002	0,009	6
B2	10,000	0,002	0,009	6
C1	20,026	0,005	0,014	6
C2	20,21	0,01	0,014	8
D1	29,895	0,002	0,019	6
D2	29,88	0,01	0,019	8
E1	59,940	0,01	0,034	8
E2	59,910	0,01	0,034	8
H1065	3,085	0,002	0,007	6
H1083	3,050	0,002	0,007	6
H1296	49,94	0,005	0,030	6
H1297	50,08	0,005	0,030	6

TABLEAU 7 (suite)

- c) Fréquence : 4,0 GHz \pm 1,0 MHz
 Température : 23 \pm 1 °C

Attenuator	A_{mean} (dB)	σ (dB)	S.E. (dB)	N
A1	5.980	0.002	0.007	6
A2	5.950	0.005	0.007	6
B1	10.165	0.004	0.009	6
B2	10.055	0.003	0.009	6
C1	20.080	0.002	0.014	6
C2	20.180	0.004	0.014	6
D1	29.945	0.007	0.019	6
D2	29.935	0.010	0.019	6
E1	59.99	0.011	0.034	6
E2	59.99	0.015	0.034	6

- d) Mesures à 7,5 GHz non achevées
-

Rapport
sur la comparaison internationale de puissance
à la fréquence de 3 GHz sur ligne coaxiale

Par G. F. ENGEN et P. A. HUDSON

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

(Document GT-RF/72-7 B)

Une comparaison internationale de puissance à 3 GHz (sur ligne coaxiale) s'est achevée récemment. Cette comparaison a été décidée à la réunion du "Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences" du Comité Consultatif d'Electricité (C.C.E.) qui s'est tenue au B.I.P.M. en mai 1965. Le National Bureau of Standards a été désigné, à cette époque, comme laboratoire pilote. Les autres laboratoires, dans l'ordre de leur participation, sont les suivants : Conseil National de Recherches (N.R.C., Canada), Institut de Métrologie D.I. Mendéléev (I.M.M., U.R.S.S.), Deutsches Amt für Messwesen und Warenprüfung (D.A.M.W., R.D.A.), Electrotechnical Laboratory (E.T.L., Japon).

Les premiers problèmes à résoudre avant que les mesures ne soient entreprises concernaient le choix des étalons voyageurs et la compatibilité des connecteurs. En ce qui concerne le premier point, la plupart des laboratoires ont préféré présenter deux ou trois montures bolométriques, tandis qu'un laboratoire (N.R.C.) proposait une monture bolométrique associée à un coupleur directif. Un autre laboratoire (D.A.M.W.) ne participait à la comparaison que par la mesure des étalons envoyés par les autres laboratoires.

Initialement, il avait été prévu que le choix du connecteur serait un problème majeur ; cependant, tous les laboratoires ont décidé de leur plein gré d'utiliser le connecteur de 14 mm type GR-900. En juin 1967, tous les étalons voyageurs avaient été reçus par le N.B.S. et le cycle de mesures débutait.

La comparaison est maintenant terminée et les résultats des mesures, rassemblés par le laboratoire pilote, sont présentés au tableau I dans lequel les laboratoires ayant pris part à la comparaison sont notés dans l'ordre de leur participation. Sauf pour le N.R.C., les valeurs sont celles des efficacités réelles (en pour cent) des montures bolométriques ; pour l'étalon du N.R.C., le tableau donne le facteur d'étalonnage ou rapport de couplage. Dans le but d'uniformiser la présentation, toutes les valeurs ont été réduites à trois chiffres significatifs. Plusieurs bolomètres ont été détruits durant le cycle de mesures et cela justifie les blancs dans le tableau. Quoique les résultats incomplets de ces étalons aient été inclus, l'évaluation statistique qui suit est uniquement fondée sur les six étalons qui ont été mesurés par tous les participants.

TABLEAU I

Résultats de la comparaison internationale de puissance à 3 GHz

Étalons	Laboratoires						Moyenne	
	NBS		NRC	IMM	DAMW	ETL		NBS
	I	2				II		
NBS-1	97,4	97,3	98,0	97,6	97,6	97,0	97,8	97,6
NBS-2	98,3	98,4	98,7	98,2			98,7	
ETL3-1F	97,8	97,8	98,0	98,1	97,7	97,5	98,2	97,9
ETL3-2F	96,9	96,9	97,3	97,1	97,6	96,6	97,1	97,0
IMM-2	98,0	98,1	98,7	99,0	98,5	98,5	98,6	98,6
IMM-4				99,0				
IMM-6	98,4	98,4	99,0	99,1	98,5	98,0	98,9	98,7
IMM-7				98,9		98,4		
NRC-1	8,88	8,85	8,84	8,85	8,87	8,89	8,83	8,86
Ecart moyen	- 0,23		+ 0,23	+ 0,20		- 0,43	+ 0,20	
Variance	0,16		0,11	0,15	0,29	0,19	0,13	

A l'exception de l'étalon du N.R.C., les étalons voyageurs sont des montures bolométriques et les valeurs citées sont les efficacités réelles (en pour cent) obtenues par les laboratoires participants. L'étalon du N.R.C. consistait en un coupleur associé à une monture bolométrique et les valeurs citées sont celles du rapport de couplage.

La première colonne NBS donne deux valeurs pour chacun des différents étalons. Ce sont les valeurs obtenues par le laboratoire pilote en début et fin du cycle de la comparaison. Les résultats des deux mesures sont pratiquement identiques ; en conséquence, la stabilité des étalons voyageurs ne présentait aucun problème. (Dans le calcul ultérieur des moyennes, ces deux déterminations sont considérées comme une seule mesure).

Dans l'avant-dernière colonne (NBS II), une autre série de valeurs est donnée. Ces valeurs ont été obtenues tout d'abord par l'évaluation de l'efficacité d'une monture sur guide d'onde par la méthode de l'impédance, puis par l'utilisation d'une transition connue pour obtenir une comparaison avec l'étalon voyageur. L'erreur de substitution qui résulte du remplacement de la puissance haute fréquence par la puissance en courant continu a été démontrée comme étant négligeable dans ce cas ; cependant, étant donné le nombre important de réglages et de mesures, la précision attendue par cette méthode n'est pas aussi bonne que celle qui est fournie par la méthode du calorimètre NBS, d'où sont tirées les valeurs données dans la première colonne. Cette série de mesures représente cependant une autre évaluation indépendante (à la fois des méthodes et des personnes) et a été traitée comme telle.

Les moyennes des résultats obtenus par le N.B.S., le N.R.C., l'I.M.M., l'E.T.L. et NBS II sont données dans la dernière colonne du tableau I. (Le D.A.M.W. n'ayant fourni que des valeurs relatives, il n'a pas été inclus dans le calcul de ces moyennes). Si l'on donne un poids égal aux résultats individuels, ces moyennes représentent les meilleures estimations des efficacités réelles ou du facteur d'étalonnage des étalons respectifs.

En comparant les résultats des laboratoires pris individuellement avec ces moyennes, on voit qu'ils tendent de façon significative à être supérieurs ou inférieurs. Il est raisonnable d'en interpréter la cause comme une erreur constante des étalons conservés dans les différents laboratoires. L'avant-dernière ligne du tableau donne l'écart moyen de chaque laboratoire par rapport à la moyenne de tous les laboratoires. (Dans ce contexte, il faut noter qu'une erreur systématique de l'étalon du laboratoire, qui fait que les valeurs mesurées de l'efficacité réelle sont faibles, aura aussi pour résultat que le facteur d'étalonnage (de l'étalon du N.R.C.) sera grand et

réciproquement. En tenant compte de cela et pour donner à l'étalonnage de cet étalon le même poids relatif qu'aux autres, l'inverse des facteurs d'étalonnage a été multiplié par 8,68 puis associé aux efficacités réelles pour obtenir les valeurs citées). Il est remarquable qu'en aucun cas l'erreur systématique ne dépasse 0,5 %, et que dans la plupart des cas elle est inférieure à 0,25 %.

Comme on l'a déjà fait remarquer, les résultats du D.A.M.W. étaient seulement des valeurs relatives; il n'a donc pas été possible d'effectuer des comparaisons avec le D.A.M.W. sur ce point. Au lieu de cela, les résultats des mesures donnés par le D.A.M.W. (qui étaient fondés sur une valeur arbitraire de 100 % pour l'efficacité réelle attribuée à l'étalon du D.A.M.W.) ont été corrigés par le facteur 0,984 pour obtenir le meilleur accord avec les autres résultats. (Les efficacités réelles et le facteur d'étalonnage ont été respectivement multipliés et divisés par cette valeur). La valeur 0,984 est donc une mesure de l'efficacité réelle de l'étalon du D.A.M.W.

En plus de la précision des étalons de référence des laboratoires, la précision de l'étalonnage de transfert à d'autres étalons (par exemple les étalons voyageurs) est aussi intéressante. Les erreurs ainsi introduites, au moins par l'expérience du laboratoire pilote, sont de nature aléatoire plutôt que systématique.

En vue de détecter la présence de ce type d'erreur, il est commode "d'ajuster" les résultats des autres laboratoires (comme cela a été fait pour le D.A.M.W.) de sorte que l'écart moyen soit éliminé. Après cette opération, les erreurs de nature aléatoire apparaissent comme une dispersion dans les résultats individuels quand ils sont comparés aux valeurs (supposées) exactes provenant de la colonne des moyennes. Cette "dispersion" est commodément mesurée par la variance des différences individuelles ; cette variance est donnée dans la dernière ligne du tableau I.

BIBLIOGRAPHIE

Les méthodes de mesure utilisées par les différents laboratoires sont exposées dans les publications suivantes :

N.B.S.

CRAWFORD (M.L.), A new RF-DC substitution calorimeter with automatically controlled reference power, *IEEE Trans. on Instr. & Meas.*, Vol. IM-17, No. 4, Dec. 1968, pp. 378-384.

N.R.C.

JURKUS (A.), A coaxial radio-frequency power standard, *IEEE Trans. on Instr. & Meas.*, Vol. *IM-15*, Dec. 1966, pp. 338-342.

I.M.M.

KRZHIMOVSKI (V.I.), KSHIMOVSKI (V.V.), SERGEEV (I.A.), Coaxial bolometer mounts for accurate measurements of power in the frequency range between 0.03 and 10 GHz, *Izmeritel'naja Technika*, No. 5, 1967.

MOROZOVA (T.B.), Apparatus for the verification of power meter, *New Scientific Research Works on Metrology*, No. 6, 1964.

D.A.M.W.

LUHE (F.), Precision microwave power measurement, In "Proceedings of the third Colloquium on Microwave Communication", Budapest, 1966.

NEUMANN (K.), Ein thermischer Leistungsmesser, *Feingerätetechnik*, 18, No. 2, 1969.

E.T.L.

FUJISAWA (K.), Microwave power standard at 3 GHz, *Bull. Electrotechnical Laboratory*, 33, No. 4, 1969 (En japonais).

FUJISAWA (K.) and ENDO (M.), Transfer standards and their comparator for the international comparison of the coaxial small power, *loc. cit.*

NBS II

ENGEN (G.F.), A bolometer mount efficiency measurement technique, *J. Res. N.B.S.*, 65C, No. 2, Apr.-June 1961, pp. 113-124.

JARVIS (S.) and ADAMS (J.W.), Calculation of substitution error in barretters, *J. Res. N.B.S.*, 72C, No. 2, Apr.-June 1968, pp. 127-137.

ANNEXE E 18

Rapport sur la comparaison internationale des mesures de permittivité complexe à 9 GHz

Par H. E. BUSSEY

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

(Traduction du Document GT-RF/72-7 C)

Abstract.— Dielectric constant and loss measurements made by three national laboratories (of the USSR, Canada, and USA) are compared. The two materials measured were glasses. The measurements utilized cavity resonators in the H_{01n} mode. The errors in dielectric constant reported by the laboratories were usually $\pm 0.3\%$; actual differences between laboratories of the average corrected results were only $\pm 0.05\%$. The loss tangent results disagreed when multimoding occurred; however, the errors may be as low as $\pm 0.000\ 02$ or $\pm 3\%$, whichever is the larger, if multimoding is avoided.

I. INTRODUCTION

En 1965, le "Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences" du Comité Consultatif d'Electricité a organisé plusieurs comparaisons internationales de mesures électriques. De telles comparaisons aident les participants à évaluer la précision de leurs mesures. Ce rapport concerne la comparaison de mesures de paramètres diélectriques.

Les participants étaient les laboratoires suivants : Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques (I.M.P.R., U.R.S.S.), Conseil National de Recherches (N.R.C., Canada), National Physical Laboratory (N.P.L., Royaume-Uni) qui s'est finalement retiré, et National Bureau of Standards (N.B.S., Boulder, États-Unis) qui fut désigné comme laboratoire pilote.

Une comparaison circulaire avait été prévue, les échantillons devant être mesurés successivement par les divers laboratoires. En fait, seuls deux laboratoires, l'I.M.P.R. et le N.R.C. (D. Morris) ont mesuré les échantillons voyageurs. Le N.B.S. (H.E. Bussey) a effectué les mesures sur ses propres barreaux provenant du même stock.

Ce rapport décrit les caractéristiques des échantillons y compris leur homogénéité, présente certains détails sur les mesures effectuées par chaque laboratoire et donne les résultats des mesures ⁽¹⁾.

II. ÉCHANTILLONS ET MATÉRIAUX

Les échantillons qui ont circulé étaient des disques de 50 mm de diamètre provenant de matériaux (silice fondue et verre) entreposés au N.B.S. Le polissage des échantillons a été réalisé à l'I.M.P.R. La silice fondue avait la même provenance que celle qui fut utilisée pour la comparaison de 1964 [1]. Avant la comparaison de 1964, l'homogénéité et l'isotropie de la silice avaient été vérifiées avec une précision de 0,15 % pour ϵ' et de 10^{-5} pour la tangente de l'angle de perte. (Les notations utilisées seront pour la permittivité relative : $\epsilon/\epsilon_0 = \epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$, et pour la tangente de l'angle de perte : $\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$). Le verre utilisé était nouveau. Avant la présente comparaison, trois barreaux de verre ont été contrôlés au N.B.S. afin d'en évaluer l'homogénéité et l'isotropie ; les variations étaient de $\pm 0,007$ pour ϵ' et de $\pm 0,000\ 02$ pour $\tan \delta$, et pouvaient être attribuées à l'imprécision de nos mesures. Ainsi, aucune inhomogénéité ou anisotropie ne fut mise en évidence. En fait, les matériaux ne comportant pas de défauts visibles et ayant été soigneusement recuits par le fournisseur, il ne devait y avoir aucun défaut.

La dispersion du verre pouvait ne pas être négligeable dans l'intervalle de fréquence (9,2 à 9,5 GHz) retenu pour la comparaison. Elle peut être évaluée à partir des mesures suivantes effectuées au N.B.S. à trois fréquences (voir ci-après la description du N.B.S. pour la méthode de mesure).

(1) Les résultats des mesures de l'I.M.P.R. ont été reçus en 1967 et la description des mesures a été reçue du GOSSTANDART en 1973 ; les auteurs n'étaient pas mentionnés. La description des mesures et les résultats du N.R.C. ont été reçus en 1969.

f	ϵ'	$\tan \delta \times 10^4$	Diamètre de l'échantillon
2,75 GHz	6,17	34,7	19,05 mm
3,75	6,16	(40,3) (a)	19,05
9,2	6,155	47,5	6,35

(a) Cette valeur est probablement trop élevée car le trou supérieur était au-delà de la fréquence de coupure pour le mode H_{11} . Cette situation produit toujours des pertes radiatives à travers le trou.

La dispersion dans l'intervalle 9,2 à 9,5 GHz doit être calculée par extrapolation des résultats précédents. La variation de ϵ' entre 9,2 et 9,5 GHz est considérée comme négligeable devant la valeur des erreurs habituelles. La variation de $\tan \delta$ est de 0,000 06 en utilisant une extrapolation linéaire, mais se réduit à 0,000 03 en tenant compte de la non-linéarité.

III. MÉTHODES DE MESURE

Quelques caractéristiques générales de la méthode de la cavité résonante utilisée sont d'abord présentées, suivies des descriptions des méthodes de mesure et des résultats de chaque laboratoire. Ces descriptions sont données telles qu'elles ont été fournies par les laboratoires.

La figure 1 montre le schéma général du montage hyperfréquence utilisé pour mesurer la résonance, la perte d'insertion et le facteur de qualité Q de la cavité résonante. Ces grandeurs mesurées d'abord sans, puis avec l'échantillon, permettent, à partir de la théorie [2], le calcul de la permittivité complexe.

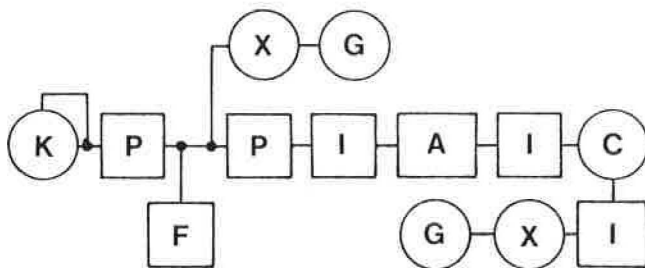


Fig. 1.- Dispositif pour mesurer Q , la fréquence et la perte d'insertion de la cavité résonante C.

K, klystron ; P, atténuateur d'isolement ; F, compteur de fréquence ; X, cristal ; G, indicateur de puissance ; I, isolateur ; A, atténuateur étalonné.

La cavité représentée à la figure 2 avec les deux types d'échantillon utilisés - disque et barreau - sert dans toutes les discussions. Un seul échantillon devrait s'y trouver à la fois. Le N.R.C. utilisait un couplage par la paroi terminale (Bleaney [7]) au lieu du couplage par la paroi latérale tel qu'il est représenté sur la figure 2. Habituellement, la fréquence de résonance est rétablie à l'aide d'un réglage très

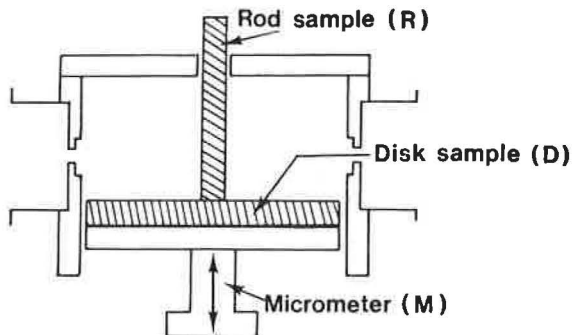


Fig. 2.- Cavité résonante accordable dans laquelle l'un ou l'autre des échantillons représentés est utilisé.

R, barreau échantillon ; D, disque échantillon ; M, déplacement à vis micrométrique.

précis par vis micrométrique. Le Q_L en charge est donné en fonction du Q de la cavité à vide (Q_u) et de celui des accès (Q_p) par les formules classiques :

$$(1) \quad Q_u^{-1} = Q_L^{-1} (1 - T^{1/2})$$

$$(2) \quad \Sigma Q_p^{-1} = Q_L^{-1} T^{1/2}$$

où T est la fraction de puissance transmise à la résonance. On suppose des couplages identiques à l'entrée et à la sortie. L'entraînement de Q par réflexion étant propre à chaque accès, c'est-à-dire non symétrique, la suppression des contributions des Q_p par la méthode précédente peut introduire une légère erreur, négligeable, dans la mesure de la tangente de l'angle de perte.

Les principaux facteurs qui contribuent à l'incertitude sur la valeur de Q sont probablement les variations de température, l'instabilité du klystron, ainsi que l'étalonnage de l'atténuateur. La dérive de la température de la cavité contribue à

l'incertitude à cause du délai qui s'écoule entre la mesure de deux fréquences donnant la largeur de bande. Les contributions de l'instabilité de puissance et de l'erreur sur l'atténuation ont été étudiées par ailleurs [3].

L'analyse détaillée des erreurs sur la mesure de Q faite par les différents laboratoires dépasse le cadre de ce rapport ; ces erreurs peuvent néanmoins être discutées ici de façon générale à partir des résultats obtenus pour $\tan \delta$. La théorie donne l'équation :

$$(3) \quad \tan \delta = H Q_s^{-1} / \epsilon'$$

où H est l'inverse du facteur de remplissage et

$$(4) \quad Q_s^{-1} = Q_{u,s}^{-1} - R Q_{u,e}^{-1}$$

R est un facteur théorique connu qui tient compte de la redistribution des courants et des champs produite par l'échantillon, les indices s et e correspondent respectivement aux mesures effectuées avec ou sans échantillon. Les mesures de $\tan \delta$ ont donné des variations d'environ $\pm 10^{-5}$, sauf dans le cas où plusieurs modes oscillent. H/ϵ' varie d'environ 1 à 10 pour les divers échantillons et dispositifs, ce qui signifie que la mesure de la différence des largeurs de bande peut être répétée à 10^5 ou 10^4 Hz près.

L'existence de plusieurs modes doit être évitée. La séparation entre les dégénérescences des modes H_{01n} et E_{11n} du résonateur vide doit être suffisante. Cette séparation se fait par les dispositifs de couplage, l'espace autour de la paroi terminale ou par l'introduction d'une autre perturbation. La séparation doit être suffisante également lorsque l'échantillon est introduit. Il faut pour cela éviter que l'épaisseur électrique de l'échantillon soit un multiple entier de $\pi/2$ radians. De même il faut éviter les modes croisés. Si l'échantillon ne peut être positionné plusieurs fois sans entraîner des variations de Q , il est probable qu'il existe des modes couplés.

La théorie [2] pour déterminer ϵ' fait appel à la condition de conservation de l'impédance à la séparation air-échantillon, et donne pour le disque l'équation suivante :

$$(5) \quad k_1^{-1} \tan(k_1 d) = -k_0^{-1} \tan k_0 (L-d),$$

où les k sont les nombres d'onde, d l'épaisseur du disque et L la longueur de la cavité. La permittivité relative ϵ' est

contenue implicitement dans k_1 qui se rapporte à la partie où se trouve l'échantillon. Une équation semblable existe dans le cas du barreau, avec des fonctions radiales.

Pour les matériaux à faibles pertes utilisés, on suppose que les champs et les pertes peuvent être calculés séparément. Si les pertes étaient suffisamment élevées, la théorie avec arguments complexes serait utilisée.

A. Description des mesures effectuées au N.B.S.

Les mesures (à 23 ± 1 °C) ont été effectuées à 9,2 GHz avec le mode H_{011} en utilisant des barreaux cylindriques ; le diamètre était de 6,35 mm pour les barreaux en verre et pour celui en silice utilisé dans la plupart des expériences. Afin d'avoir un facteur de remplissage plus élevé, un barreau en silice de diamètre 9,525 mm fut également utilisé lors d'une expérience. Le diamètre de la cavité était de 47,625 mm.

Les solutions exactes [4, 5] pour la cavité, sans et avec échantillon, furent modifiées à l'aide de la théorie des perturbations, afin de tenir compte des effets des iris et du trou de passage de l'échantillon.

La principale contribution à l'erreur sur ϵ' s'écrit :

$$\Delta\epsilon' \approx -(\epsilon' - 1) \epsilon \Delta a/a,$$

où Δa est l'erreur sur le rayon a de l'échantillon et ϵ est égal à 4 pour un diamètre de l'échantillon très faible et égal à 3,5 environ dans le cas présent. L'erreur typique sur la mesure du diamètre des barreaux est estimée à $\pm 0,0025$ mm, conduisant à une erreur de $\pm 0,12$ % pour ϵ' , ce qui correspond approximativement à la variation des mesures de ϵ' pour les trois barreaux en verre de 6,147 à 6,161. Pour le barreau en silice de 6,35 mm de diamètre $\epsilon' = 3,826$, pour celui de 9,52 mm $\epsilon' = 3,824$. Toutes les valeurs se rapportent au vide en prenant $\epsilon' = 1,0005$ pour l'air de Boulder.

Pour un même barreau, la mesure de $\tan \delta$ peut être répétée à $\pm 5 \times 10^{-6}$ près ; cependant des variations de $\pm 2 \times 10^{-5}$ ou plus se produisent occasionnellement. Les trois barreaux en verre dont les résultats apparaissent dans le tableau III ont donné les valeurs suivantes pour $\tan \delta$: 47,53, 47,46, 47,25, 47,64, 47,55, 47,24 $\times 10^{-4}$. Les valeurs mesurées de $\tan \delta$ pour la silice s'échelonnent de 1,21 à 1,34 $\times 10^{-4}$. Il y avait deux dimensions de barreaux et trois observateurs ont participé aux mesures.

En plus de cette erreur aléatoire, il pourrait exister une erreur égale à une fraction de la valeur de $\tan \delta$ et qui deviendrait prédominante pour des valeurs plus élevées de $\tan \delta$ (voir le paragraphe IV).

Dans le travail de 1964 [1], ϵ' était égal à 3,83 pour la silice ; avec une nouvelle cavité la valeur est maintenant 3,826. La raison de cette différence est peut-être l'absence de rainure dans la nouvelle cavité ; on considère en effet actuellement que cela conduit à des résultats plus exacts qu'avec la rainure conseillée dans la référence [1].

B. Description des mesures effectuées au N.R.C.

Les mesures ont été faites sur un petit domaine de fréquence au voisinage de 9,2 GHz, à l'aide d'une cavité résonante fonctionnant sur le mode H_{01n} . Plusieurs fréquences ont été utilisées afin de mettre en évidence toute erreur systématique dans les mesures. La cavité, de diamètre interne 50,873 mm, était conçue pour utiliser des disques échantillons de 50,8 mm de diamètre (2 inches) et se trouvait donc trop large pour les disques de 50 mm utilisés pour cette comparaison. Chaque échantillon était centré à l'aide d'un gabarit sur le piston mobile formant la paroi inférieure de la cavité. Celle-ci est semblable à celle qui est décrite par Rushton et Parry [6]. Un couplage par la paroi supérieure était utilisé, ainsi que l'ont décrit Bleaney *et al* [7].

Le domaine de fréquence utile de la cavité était limité par les facteurs suivants :

1. La course possible du piston ne permettait l'excitation des modes H_{014} et H_{015} dans le résonateur vide qu'entre 9,16 et 9,22 GHz.

2. Des interférences entre les modes H_{014} et H_{215} se produisaient à certaines fréquences, spécialement lorsqu'un échantillon se trouvait dans la cavité.

Les mesures sur les échantillons en silice ont été faites entre 9,182 et 9,213 GHz. Pour les échantillons en verre, les mesures ont été faites de 9,197 à 9,213 GHz pour l'échantillon le plus mince et de 9,182 à 9,199 GHz pour l'échantillon le plus épais. Les mesures ont été effectuées à une température ambiante de $22,5 \pm 1$ °C et une humidité relative comprise entre 18 et 27 %. Les échantillons étaient conservés dans un dessiccateur en dehors des mesures.

Pour chaque échantillon, la constante diélectrique et la tangente de l'angle de perte ont été mesurés dix fois. Deux mesures ont été effectuées à cinq fréquences différentes, l'échantillon étant retourné pour la seconde mesure. Deux séries de mesures complémentaires ont été faites sur l'échantillon en verre le plus mince. Ces mesures ont confirmé les résultats antérieurs qui montraient une légère variation de la tangente de l'angle de perte avec la fréquence.

Les valeurs de la constante diélectrique ont été corrigées pour tenir compte de la différence entre le diamètre de l'échantillon et celui de la cavité [8]. De plus, on a appliqué à la tangente de l'angle de perte une correction pour les pertes dues au couplage [5,9]. Les valeurs de la constante diélectrique sont relatives au vide en prenant la constante diélectrique de l'air égale à 1,000 61.

Dans le cas des échantillons en silice, la variation des résultats semblait aléatoire dans le petit domaine de fréquence utilisé. Dans le cas des échantillons en verre, surtout pour le plus mince, les propriétés semblaient dépendre de la fréquence. Les variations observées étaient plus importantes que ne pouvait l'expliquer la dispersion des propriétés diélectriques dans le très petit domaine de fréquence utilisé ; ces variations étaient vraisemblablement dues au couplage de modes. Par exemple, les valeurs moyennes de la tangente de l'angle de perte des échantillons en verre étaient $49,4 \times 10^{-4}$ pour l'échantillon le plus mince et $46,8 \times 10^{-4}$ pour l'échantillon le plus épais, avec des dispersions de $3,3 \times 10^{-4}$ et $1,6 \times 10^{-4}$ respectivement. On pourrait s'attendre à ce que les mesures sur l'échantillon en verre le plus épais, d'épaisseur très voisine d'une demi-longueur d'onde, soient très affectées par les couplages de modes. Cependant, la valeur de la tangente de l'angle de perte pour cet échantillon, égale à $46,8 \times 10^{-4}$ (Tableau III), est plus proche des valeurs obtenues par les autres laboratoires que ne l'est celle relative à l'échantillon plus mince. La variation maximale des valeurs de la constante diélectrique est inférieure à 0,08 % pour chaque échantillon.

Aron [10,11] a trouvé que, pour un résonateur H_{01n} avec couplage de type Bleaney, les valeurs mesurées de la constante diélectrique et de la tangente de l'angle de perte d'échantillons d'alumine variaient avec l'épaisseur de l'échantillon. Il a également observé des valeurs anormalement faibles pour la tangente de l'angle de perte d'échantillons en silice. Ces effets étaient en partie attribués à la présence du mode dégé-

né E_{11n} , et leurs amplitudes étaient réduites à l'aide d'un certain système de couplage [11]. L'utilisation de ce système de couplage ne put, cependant, être adoptée dans cette étude.

Zal'tsman [13] a montré qu'il peut exister une couche d'air résiduelle entre le disque et le piston formant la paroi inférieure de la cavité. L'influence de cette couche sur la valeur mesurée de la constante diélectrique varie en fonction de l'épaisseur de l'échantillon. Pour plusieurs disques échantillons, Zal'tsman a trouvé que l'épaisseur de la couche d'air était d'environ 0,02 mm.

Aucune détermination semblable de la couche d'air résiduelle n'a été faite dans cette étude. Cependant, en supposant une couche d'épaisseur 0,02 mm, les corrections à apporter aux valeurs de la constante diélectrique sont, dans notre cas :

disque en silice mince	- 0,010
disque en silice épais	- 0,002
disque en verre mince	- 0,010
disque en verre épais	- 0,000 5

et les valeurs corrigées de la constante diélectrique deviennent respectivement 3,820, 3,826, 6,158 et 6,144. Les valeurs moyennes pour la silice et le verre sont alors respectivement 3,823 et 6,151.

C. Description des mesures effectuées à l'I.M.P.R.

La cavité résonante utilisée pour les mesures était en cuivre argenté, de diamètre intérieur 50 mm. Les modes H_{011} et H_{012} étaient couplés à travers des iris de 5 mm de diamètre, dans la paroi cylindrique. La dégénérescence du mode E_{11n} du résonateur rempli d'air était éliminée par l'introduction d'un disque en quartz fondu relativement mince (jusqu'à 1 mm d'épaisseur) [12].

La fréquence du générateur hyperfréquence, 9 468 MHz, était mesurée à l'aide d'un générateur avec oscillateur à quartz stabilisé en température. Un générateur à fréquence intermédiaire avec asservissement en phase était utilisé.

Les résultats des mesures et leur analyse sont résumés dans les tableaux I et II. Ces résultats proviennent de huit déterminations (chacune d'elles comprenant dix mesures) effectuées sur une période de plusieurs mois.

Deux corrections ont été apportées aux valeurs moyennes de ϵ' (Tableau I). La première correction résulte de la présence de la couche d'air résiduelle entre le disque et la partie inférieure du résonateur [13].

La seconde correction conduit à exprimer les valeurs de ϵ' par rapport au vide alors que les résultats originaux les exprimaient par rapport à l'air, dont la constante diélectrique a été prise égale à 1,000 8.

TABLEAU I

Résultats des mesures, corrections pour la couche d'air et autres facteurs relatifs à la détermination de ϵ' pour les quatre disques

Grandeur	Numéro de l'échantillon			
	Verre 1	Verre 2	Silice 3	Silice 4
Épaisseur (en mm)	5,562	6,652	7,811	6,261
Valeur moyenne de ϵ' (non corrigée)	6,156	6,149	3,824	3,829
Incertitude (3σ) ^(a)	$\pm 0,12\%$	$\pm 0,18\%$	$\pm 0,12\%$	$\pm 0,18\%$
Domaine de dispersion	$\pm 0,06\%$	$\pm 0,09\%$	$\pm 0,07\%$	$\pm 0,08\%$
Épaisseur électrique ^(b)	0,829	0,990	0,887	0,710
Correction pour la couche d'air ^(c)	- 0,008	- 0,000	- 0,002	- 0,009
ϵ' corrigé	6,148	6,149	3,822	3,820
$\epsilon' \times 1,000\ 8$ ^(d)	6,153	6,154	3,825	3,823

(a) Écart quadratique moyen multiplié par 3.

(b) En unités de π radians.

(c) Pour une couche d'air de $20\ \mu\text{m} \pm 30\%$ entre le disque et la paroi inférieure de la cavité.

(d) La dernière ligne donne ϵ' par rapport au vide, avec $\epsilon' = 1,000\ 8$ pour l'air.

La correction (négative) pour la couche d'air est nulle pour une épaisseur électrique du disque diélectrique égale à un multiple entier de la demi-longueur d'onde et supérieure à zéro pour des épaisseurs différentes. Le calcul de la correction est donné dans [13]. L'épaisseur de la couche d'air résiduelle était $20\ \mu\text{m} \pm 30\%$ pour tous les échantillons.

La mesure de la tangente de l'angle de perte a été effectuée par la méthode de transmission [9], équivalente à celle de Bussey [5]. (L'existence des travaux de Bussey fut connue en U.R.S.S. par la publication [14]).

Le Q de la cavité pour le mode H_{012} était de 25,160, avec une incertitude de $\pm 2\%$. Les résultats des mesures de perte sont donnés dans le tableau II; ils reposent sur les déterminations mentionnées précédemment. Les résultats sont corrigés pour tenir compte des effets de couplage des accès [9,15]. Après

TABLEAU III

Résultats et erreurs estimées des dispositifs de mesure de permittivité complexe

Laboratoires	ϵ' (partie réelle) et erreur $[\times(\pm 10^2)]$ sur ϵ'						$\tan \delta \times 10^4$ et erreur $[\times(\pm 10^4)]$ sur $\tan \delta$					
	VERRE						VERRE					
	Disque 5,562*		Disque 6,652*		Barreau 6,35*		Disque 5,562*		Disque 6,652*		Barreau 6,35*	
IMPR(a)	6,153	0,3	6,154	0,3	-	-	46,7	1,0	47,5	1,0	-	-
NRC(b)	6,169	0,3	6,144	0,3	-	-	49,4	1,7	46,8	0,7	-	-
NBS(c)	-	-	-	-	6,155	0,3	-	-	-	-	47,5	1,0
	SILICE						SILICE					
	Disque 7,81*		Disque 6,26*		Barreau		Disque 7,81*		Disque 6,26*		Barreau	
IMPR(a)	3,825	0,2	3,823	0,2	-	-	1,28	0,1	1,27	0,1	-	-
NRC(b)	3,828	0,2	3,830	0,2	-	-	0,95	0,2	0,98	0,1	-	-
NBS(c)	-	-	-	-	3,826	0,3	-	-	-	-	1,29	0,1

* Epaisseur (en mm) pour les disques et diamètre (en mm) pour les barreaux.

- (a). Le domaine de dispersion des valeurs de ϵ' est inférieur à 10^{-3} et celui de $\tan \delta$ est inférieur à 10^{-4} (verre) et 10^{-5} (silice). $f = 9,5$ GHz.
- (b). Pour les échantillons en silice, le domaine de dispersion des valeurs de ϵ' est inférieur à 10^{-3} et celui de $\tan \delta$ est de l'ordre de 10^{-5} . La mesure de ϵ' pour la silice peut être répétée à quelques 10^{-4} . La présence de modes multiples a pu influencer les mesures sur les échantillons en verre. Les valeurs de ϵ' ne tiennent pas compte de la correction pour la couche d'air résiduelle (voir texte). $f = 9,2$ GHz.
- (c). La mesure de ϵ' pour un même barreau peut être répétée à 10^{-3} près ; les différences entre les barreaux proviennent des erreurs sur le diamètre et contribuent aux erreurs indiquées. La mesure de $\tan \delta$ peut être répétée à $\pm 0,000 02$. Les résultats sont les valeurs moyennes obtenues avec trois barreaux en verre et deux en silice. $f = 9,2$ GHz.

cette correction, l'incertitude résiduelle n'excède pas 10^{-5} .

TABLEAU II

Valeur moyenne des tangentes de l'angle de perte des échantillons et erreurs

Unité : 10^{-4}

Grandeur	Numéro de l'échantillon			
	Verre 1	Verre 2	Silice 3	Silice 4
Valeur moyenne de $\tan \delta$	46,7	47,5	1,28	1,27
Incertitude (3σ)	$\pm 1,1$	$\pm 1,7$	$\pm 0,13$	$\pm 0,15$
Domaine de dispersion	$\pm 0,5$	$\pm 0,7$	$\pm 0,05$	$\pm 0,07$

IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le tableau III présente les résultats et les erreurs tels qu'ils ont été communiqués par chaque laboratoire. Des renvois donnent des détails supplémentaires sur la méthode utilisée pour obtenir les valeurs données dans le tableau, et d'autres précisions sont incluses dans les descriptions précédentes.

Une comparaison entre les résultats obtenus pour les barreaux et pour les disques est donnée dans le tableau IV. Les résultats du N.R.C. sur les disques tiennent compte d'une correction pour une couche d'air d'épaisseur supposée égale à 0,02 mm, épaisseur mesurée dans la référence [13] .

TABLEAU IV

Comparaison des valeurs moyennes de ϵ' et de $\tan \delta$ pour les barreaux et les disques après correction

Matériau	Méthode du Disque		Méthode du Barreau
	IMPR (URSS)	NRC (Canada)	NBS (Etats-Unis)
Silice fondue, ϵ'	3,824	3,823	3,826
Verre, ϵ'	6,153 5	6,151	6,155
Silice fondue, $\tan \delta$	1,275	0,975	$1,285 \times 10^{-4}$
Verre, $\tan \delta$	47,1	46,8(a)	$47,5 \times 10^{-4}$

(a) Résultat pour le disque le plus épais seulement.

Il apparaît, d'après la bonne concordance des valeurs de ϵ' , que les erreurs spécifiées par les laboratoires dans le tableau III sont en fait trop importantes. La dispersion des valeurs de ϵ' dans le tableau IV est inférieure à 0,08 %.

Les incertitudes sur $\tan \delta$ ne paraissent cependant pas surestimées. Dans un même laboratoire ou entre les différents laboratoires on constate entre les échantillons des différences de 0,000 03 pour la silice et de 0,000 2 ou plus pour le verre. Ces erreurs ne sont pas très importantes ; cependant, l'expérience montre que pour certains échantillons l'exactitude de la valeur de $\tan \delta$ est meilleure que les écarts mentionnés précédemment. Les erreurs sur la valeur de $\tan \delta$ résultent habituellement du couplage des modes.

La présence d'un couplage de modes indésirable est habituellement mise en évidence par des variations dans les valeurs de Q et de la transmission, lorsqu'on refait une mesure après avoir remis en place l'échantillon. Dans ces cas, des incertitudes plus importantes devraient être spécifiées.

Il semblerait que l'on puisse conclure d'après les résultats présentés ici et en [11] , que le couplage par la paroi terminale n'est pas aussi bon que le couplage à travers la paroi cylindrique.

Les erreurs sur les valeurs mesurées lors de cette comparaison sont bien moindres que celles des mesures hyperfréquences de la comparaison de 1964 [1] . La silice avait la même origine pour les deux comparaisons. On pense que la valeur moyenne $\epsilon' = 3,824$ trouvée dans cette étude est plus correcte que celle de 1964 (3,832). La valeur moyenne de $\tan \delta$, $1,2 \times 10^{-4}$ est également plus précise que toutes les valeurs de 1964.

Les erreurs de mesure sur $\tan \delta$ s'écrivent soit $\pm y$ (faible valeur, 0,000 02 par exemple), soit $\pm x \%$, suivant celle qui est la plus importante. D'après la présente étude, on pourrait conclure que $x \%$ est de l'ordre de 2 à 3 % pour une cavité résonnante de bonne qualité et pour un échantillon qui laisse les valeurs de Q et de la transmission inchangées après sa remise en place.

Nous remercions le B.I.P.M. pour son assistance dans cette comparaison, ainsi que la Corning Glass Company pour la fourniture des matériaux utilisés. Nous remercions aussi H.M. Altschuler (N.B.S.) pour ses conseils et A. Scavennec (C.N.E.T., Paris) pour la traduction française de ce rapport.

BIBLIOGRAPHIE

1. BUSSEY (H.E.) and GRAY (J.E.), BAMBERGER (E.C.), RUSHTON (E.), RUSSELL (G.), PETLEY (B.W.), and MORRIS (D.), International comparison of dielectric measurements, *IEEE Trans. on Instr. and Meas.*, IM-13, Dec. 1964, pp. 305-311.
2. HORNER (F.), TAYLOR (T.A.), DUNSMUIR (R.), LAMB (J.) and JACKSON (W.), Resonance methods of dielectric measurements at centimeter wavelengths, *J. IEE (London)*, 93, Pt. 3, Jan. 1946, pp. 53-68.
3. BUSSEY (H.E.), Standards of measurements of microwave surface impedance, skin depth, conductivity and Q, *IRE Trans. on Instr.*, I-9, Sept. 1960, pp. 171-175.
4. FOULDS (K.), Resonant cavity measurement of the relative permittivity of a dc discharge, *J. IEE (London)*, 102, Pt. C, 1955, pp. 203-216.
5. BUSSEY (H.E.), Cavity resonator dielectric measurements on rod samples, In "1959 Annual Report of the Conference on Electrical Insulation", National Research Council publication 756, National Acad. of Sc., Washington, D.C., Oct. 1959, pp. 15-20.
6. RUSHTON (E.) and PARRY (J.V.L.), The measurement of permittivity and power factor of ordinary solid and liquid dielectrics, In "Symposium on Precision Electrical Measurements", N.P.L., Teddington, England, November, 1954, Paper No. 2.
7. BLEANEY (B.), LOUBSER (J.H.N.) and PENROSE (R.P.), Cavity resonators for measurements with centimeter electromagnetic waves, *Proc. Phys. Soc. (London)*, 59, 1947, pp. 185-189.
8. BUSSEY (H.E.) and GRAY (J.E.), Measurement and standardization of dielectric samples, *IRE Trans. on Instrumentation*, I-11, 1962, pp. 162-165.
9. ZAL'TSMAN (E.B.), Measuring $\tan \delta$ of dielectrics by transmission through a resonator, *Priboyni Tekhn. Eksperim.* No. 6, 1965, pp. 101-104. For English translation see *Instr. Expl. Tech. (USSR)* No. 6, 1965, pp. 1408-1412.
10. ARON (C.P.) and WATKINS (J.), Measurement of dielectric properties of low-loss ceramics at microwave frequencies, *Proc. IEE*, 112, 1965, pp. 1252-1256.
11. ARON (C.P.), Effect of degenerate H_{11n} mode in H_{01n} mode cavity on the measurement of complex permittivity, *Proc. IEE*, 114, 1967, pp. 1030-1034.
12. BURDUN (G.D.), ZAL'TSMAN (E.B.), POYARKOVA (V.E.) and FRUMKIN (V.D.), Methods for raising precision in measuring the characteristics of dielectrics at ultrahigh frequencies, *Izmerit. Tekhn.* No. 5, 1969, pp. 62-65. Translated in *Measurement Techniques*, No. 5, 1969, pp. 682-687.
13. ZAL'TSMAN (E.B.), Permittivity measurement errors due to a residual air gap, *Izmerit. Tekhn.* No. 11, 1968, pp. 51-53. Translated in *Measurement techniques*, No. 11, 1968, pp. 1516-1519.
14. BUSSEY (H.E.), Measurement of the HF properties of materials, a survey, *PIEEE (USSR)* No. 6, 1967, pp. 344-353. Translated from *Proc. IEEE*, no. 6, 1967, pp. 1046-1053.
15. GOST 12723-67, Solid dielectrics, Method for measuring the relative permittivity and loss tangent in the range of 9 to 10 GHz, 1967.



TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ

13^e Session (1972)

	Pages E
Notice historique sur les organes de la Convention du Mètre	5
Liste des membres	7
Ordre du jour	8
Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par A. F. Dunn	9
12 ^e comparaisons (1970) des étalons nationaux de résistance et de force électromotrice (Résultats; piles dans des enceintes thermorégulées transportables; question de la température; organisation des prochaines comparaisons)	10
Enceintes thermorégulées pour le transfert du volt (Programme mis en œuvre au N.B.S.; possibilité d'utilisation de piles non saturées)	11
Comparaison internationale d'étalons de résistance de $10^4 \Omega$ (De tels étalons participeront à la 13 ^e comparaison (1973) des étalons nationaux)	11
Comparaison circulaire d'étalons de capacité de 10 pF (Situation; résultats obtenus jusqu'ici; poursuite de la comparaison)	11
Déterminations absolues des unités électriques (Travaux en cours dans les laboratoires nationaux en ce qui concerne le volt, le condensateur calculable et le coefficient gyromagnétique du proton)	12
Contrôle de la permanence des étalons de référence de force électromotrice; valeur de $2 e/h$ (Utilisation de l'effet Josephson dans plusieurs laboratoires nationaux. Adoption d'une déclaration relative à la valeur de la « fréquence Josephson » en fonction de V_{69-BI})	12
Comparaison internationale d'instruments de passage courant continu-courant alternatif (Comparaison en cours entre le N.B.S., l'I.M.M., l'E.T.L. et le N.P.L.; participation souhaitée d'autres laboratoires)	12
Présentation du Rapport du « Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences » (voir ci-après); approbation des Recommandations et du programme des comparaisons présentés par ce Groupe	13
Questions diverses (Diffusion des résultats des comparaisons internationales circulaires. Confirmation de la périodicité triennale pour les comparaisons des étalons nationaux de résistance et de f.é.m.)	13

<i>Déclaration E-72 du C.C.E. fixant à 483 594,0 GHz la valeur de la « fréquence Josephson » en fonction de V_{69-91} au 1^{er} janvier 1969</i>	13
<i>Rapport du « Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences » (État d'avancement et résultats déjà connus des comparaisons internationales. Choix des fréquences. Comparaisons à prévoir et travaux futurs. Question des connecteurs coaxiaux)</i>	14
<i>Programme des futures comparaisons</i>	16
<i>Recommandations du Groupe de travail présentées au C.C.E. :</i>	
<i>Recommandation GT-RF 1 (1972) (Confirmation des objectifs des comparaisons internationales)</i>	18
<i>Recommandation GT-RF 2 (1972) (Communication des résultats des comparaisons)</i>	18

Annexes

E 1. <i>Documents de travail présentés à la 13^e session du C.C.E.</i>	19
E 2. B.I.P.M. — <i>Rapport sur la 12^e comparaison des étalons nationaux de résistance électrique</i> (décembre 1969-mars 1970), par G. Leclerc	25
E 3. B.I.P.M. — <i>Rapport sur la 12^e comparaison des étalons nationaux de force électromotrice</i> (janvier-février 1970), par G. Leclerc	34
E 4. B.I.P.M. — <i>État d'avancement de la comparaison internationale circulaire des étalons de capacité en silice de 10 pF</i> , par G. Leclerc	45
E 5. B.I.P.M. — <i>Comportement d'une enceinte thermorégulée en fonction de la température ambiante</i> , par G. Leclerc	49
E 6. N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — <i>État d'avancement des travaux sur le volt absolu au N.B.S.</i> , par F. K. Harris	52
E 7. L.C.I.E. (France). — <i>Étalons calculés de capacité électrique</i> , par N. Elnékvé	57
E 8. P.T.B. (Allemagne). — <i>Référence de tension électrique par l'effet Josephson</i> , par V. Kose, F. Melchert, H. Fack et W. Hetzel	61
E 9. N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — <i>État des travaux sur la conservation du volt légal des États-Unis au moyen de l'effet Josephson en courant alternatif</i> , par B. F. Field	66
E 10. L.C.I.E. (France). — <i>Référence de tension utilisant l'effet Josephson alternatif</i> , par F. Delahaye	70
E 11. N.P.L. (Royaume-Uni). — <i>Valeur numérique de la constante $2 e/h$</i> , par J. J. Denton	75
E 12. E.T.L. (Japon). — <i>Convertisseurs thermiques courant alternatif — courant continu</i> , par S. Iwamoto et H. Hirayama	77
E 13. N.P.L. (Royaume-Uni). — <i>Étalons et comparateur du N.P.L. pour le passage courant alternatif — courant continu</i>	84
E 14. I.E.N. (Italie). — <i>Version améliorée du pont autoétalonnable à diviseur inductif utilisé pour la comparaison d'étalons d'inductance</i> , par E. Arri et G. Noce	87
E 15. E.T.L. (Japon). — <i>Rapport sur la première comparaison internationale d'instruments de mesure des faibles puissances à 10 GHz</i> , par R. Ishige	91
E 16. N.P.L. (Royaume-Uni). — <i>Comparaison internationale de l'affaiblissement en coaxial au-dessous de 8 GHz</i> , par R. W. Yell	99
E 17. N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — <i>Rapport sur la comparaison internationale de puissance à la fréquence de 3 GHz sur ligne coaxiale</i> , par G. F. Engen et P. A. Hudson	119
E 18. N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — <i>Rapport sur la comparaison internationale des mesures de permittivité complexe à 9 GHz</i> , par H. E. Bussey	124



IMPRIMERIE DURAND
28600 LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1974, n° 1947
Dépôt légal, Éditeur, 1974, n° 24

ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 1974-02-22

Imprimé en France