

COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ

SESSION DE 1986



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES



COMITÉ CONSULTATIF
D'ÉLECTRICITÉ

Rapport de la 17^e session
1986

Édité par le BIPM, Pavillon de Breteuil, F-92312 Sèvres Cedex, France

ISBN 92-822-2100-8

NOTICE SUR LES ORGANES DE LA CONVENTION DU MÈTRE

Le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) 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 (43 520 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 qui interviennent dans les activités ci-dessus.

Le Bureau International fonctionne sous la surveillance exclusive du Comité International des Poids et Mesures (CIPM), placé lui-même sous l'autorité de la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM).

La Conférence Générale est formée des délégués de tous les États membres de la Convention du Mètre et se réunit actuellement tous les quatre 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 d'adopter 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 actuellement tous les 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.

(1) Au 31 décembre 1986, quarante-sept États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne (Rép. Fédérale d'), Allemagne (Rép. Démocratique), Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, Canada, Chili, Chine (Rép. Pop. de), Corée (Rép. de), Corée (Rép. Pop. Dém. de), Danemark, Dominicaine (Rép.), Égypte, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran, Irlande, Israël, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Venezuela, Yougoslavie.

Une quarantaine de physiciens ou techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau International. Ils y font principalement des recherches métrologiques, des comparaisons internationales des réalisations des unités et des vérifications d'étalons dans les domaines mentionnés ci-dessus. Ces travaux font l'objet d'un rapport annuel détaillé qui est publié avec les procès-verbaux des séances du Comité International. La dotation annuelle du Bureau International est de l'ordre de 14 327 000 francs-or (en 1986), soit environ 26 000 000 de francs français.

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 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 (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 31, 1963, p. 97). Chaque Comité Consultatif, dont la présidence est généralement confiée à un membre du Comité International, est composé de délégués 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 huit :

1. Le Comité Consultatif d'Électricité (CCE), créé en 1927.
2. Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR), nouveau nom donné en 1971 au Comité Consultatif de Photométrie (CCP) créé en 1933 (de 1930 à 1933 le Comité précédent (CCE) s'est occupé des questions de photométrie).
3. Le Comité Consultatif de Thermométrie (CCT), créé en 1937.
4. Le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM), créé en 1952.
5. Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS), créé en 1956.
6. Le Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants (CEMIRI), créé en 1958. En 1969, ce Comité Consultatif a institué quatre sections : Section I (Rayons X et γ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie α); cette dernière Section a été dissoute en 1975, son domaine d'activité étant confié à la Section II.
7. Le Comité Consultatif des Unités (CCU), créé en 1964 (ce Comité Consultatif a remplacé la « Commission du Système d'Unités » instituée par le CIPM en 1954).
8. Le Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM), créé en 1980.

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 hors commerce rassemble les articles publiés dans des revues et ouvrages scientifiques et techniques, ainsi que certains travaux publiés sous forme de rapports multicopiés).

Le Bureau International publie aussi des monographies sur des sujets métrologiques particuliers et, sous le titre « *Le Système International d'Unités (SI)* », une brochure remise à jour périodiquement qui rassemble toutes les décisions et recommandations concernant les unités.

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

Secrétaire

J. DE BOER

Président

D. KIND

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ

Président

E. AMBLER, directeur du National Bureau of Standards, Gaithersburg,

Membres

AMT FÜR STANDARDISIERUNG, MESSWESEN UND WARENPRÜFUNG [ASMW],
Berlin.

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES DU CANADA [NRC], Ottawa.

CSIRO, DIVISION OF APPLIED PHYSICS [CSIRO], Lindfield (Australie).

ELECTROTECHNICAL LABORATORY [ETL], Ibaraki (Japon).

INSTITUT DE MÉTROLOGIE D.I. MENDÉLÉEV [IMM], Leningrad.

INSTITUT NATIONAL DE MÉTROLOGIE [NIM], Beijing.

INSTITUT NATIONAL DE MÉTROLOGIE [INM], Bucarest.

ISTITUTO ELETTROTECNICO NAZIONALE GALILEO FERRARIS [IEN], Turin.

LABORATOIRE CENTRAL DES INDUSTRIES ÉLECTRIQUES [LCIE], Fontenay-aux-
Roses (France).

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [NBS], Gaithersburg.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [NPL], Teddington (Royaume-Uni).

NATIONAL PHYSICAL RESEARCH LABORATORY [NPRL], Pretoria.
OFFICE FÉDÉRAL DE MÉTROLOGIE [OFMET], Wabern (Suisse).
PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [PTB], Braunschweig.
VAN SWINDEN LABORATORIUM [VSL], Delft (Pays-Bas).

Le directeur du BIPM (P. Giacomo).



ORDRE DU JOUR

de la 17^e session

I. — Effet Josephson

A. Valeurs du quotient fréquence-tension de l'effet Josephson ($2e/h$) utilisées par les laboratoires nationaux pour la conservation de leurs représentations du volt ; exactitudes obtenues.

B. $2e/h$

1. Valeurs de $2e/h$ en unités SI, avec leurs incertitudes, obtenues actuellement par des procédés directs ou indirects.
2. Perspectives pour de futures déterminations de la valeur SI de $2e/h$: incertitudes et dates prévues.

C. Étalons de tension : procédés nouveaux, résultats.

1. Accord constaté entre les étalons de tension nationaux utilisant l'effet Josephson.
2. Estimation des incertitudes liées au transfert lors de l'utilisation de piles étalons ou d'étalons à diode de Zener.
3. Utilisation et disponibilité de réseaux de jonctions Josephson.

D. Comparaisons d'étalons de transfert nationaux et d'installations Josephson à prévoir.

E. Discussion de l'adoption éventuelle d'une nouvelle valeur du quotient fréquence-tension de l'effet Josephson à utiliser pour la conservation des étalons nationaux de tension ; procédure de fixation d'une valeur commune.

II. — Effet Hall quantique

A. Valeurs et exactitudes des réalisations de la résistance de Hall quantifiée $R_H = h/e^2$ exprimées en fonction des représentations nationales de l'ohm (de préférence ramenées à une date commune, par exemple, le 1^{er} janvier 1986).

B. $R_H = h/e^2$

1. Valeurs de R_H , en unités SI, obtenues actuellement par des procédés directs ou indirects ; incertitudes associées.
2. Perspectives pour de futures déterminations de la valeur SI de h/e^2 : incertitudes et dates prévues.

C. Étalons de résistance et de capacité : procédés, résultats et précautions.

1. Résultats de la 14^e comparaison d'étalons nationaux de résistance ; accord entre les réalisations de l'ohm.
2. Résultats de la 3^e comparaison internationale d'étalons de capacité de 10 pF ; accord entre les réalisations du farad.
3. Accord entre les valeurs actuelles de R_H exprimées en unités SI et en fonction des représentations nationales de l'ohm.
4. Évaluation des incertitudes liées au transfert lors de l'utilisation de résistances ou de condensateurs étalons.
5. Précautions à respecter, compte tenu de la variation avec la fréquence des résistances et condensateurs utilisés dans les déterminations de l'ohm.
6. Précautions à respecter, lors de la caractérisation des échantillons utilisés pour réaliser la résistance de Hall quantifiée, en vue de s'assurer de la quantification correcte du gaz d'électrons à deux dimensions.
7. Disponibilité d'échantillons pour réaliser la résistance de Hall quantifiée.

D. Comparaisons à prévoir.

1. Comparaison internationale de résistances étalons de 1 Ω au BIPM.
2. Comparaison internationale de résistances étalons de 10 k Ω au BIPM.
3. Comparaison internationale d'étalons de capacité de 10 pF.
4. Comparaisons bilatérales.

E. Discussion de l'adoption éventuelle d'une valeur de la résistance de Hall quantifiée à utiliser pour la conservation des étalons nationaux de résistance. Procédure de fixation d'une valeur commune.

III. — Travaux du BIPM

IV. — Rapport du Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences

V. — Questions diverses

Résumé des travaux et des programmes de recherche en cours dans les laboratoires nationaux.

Tâches futures du CCE.



RAPPORT
DU
COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ
(17^e session — 1986)
AU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Par J. VANIER, rapporteur

Le Comité Consultatif d'Électricité (CCE) s'est réuni pour sa dix-septième session au Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon de Breteuil, à Sèvres, où il a tenu six séances les 16, 17 et 18 septembre 1986.

Étaient présents :

E. AMBLER, président du CCE.

Les délégués des laboratoires membres :

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung [ASMW],
Berlin (W. SCHLESOK).

Conseil National de Recherches du Canada [NRC], Ottawa
(B. M. WOOD, J. VANIER).

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Linfield (I. K.
HARVEY).

Electrotechnical Laboratory [ETL], Ibaraki (K. SHIDA).

Institut de Métrologie D. I. Mendéléev [IMM], Leningrad
(Y. TARBEEV, A. B. DIATLEV).

Institut National de Métrologie [NIM], Beijing (ZHANG DESHI).

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris [IEN], Turin
(S. D'EMILIO, D. ANDREONE).

Laboratoire Central des Industries Électriques [LCIE], Fontenay-
aux-Roses (J. OSWALD, R. KNOSP, L. ÉRARD).

National Bureau of Standards [NBS], Gaithersburg (B. N. TAYLOR).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (O. C. JONES,
B. P. KIBBLE).

National Physical Research Laboratory [NPRL], Pretoria
(W. M. P. MARAIS).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig
(V. KOSE).

Van Swinden Laboratorium [VSL], Delft (R. KAARLS,
K. J. P. M. HARMANS).

Le directeur du BIPM (P. GIACOMO).

Invité :

Statens Provningsanstalt, Borås (H. NILSSON).

Assistaient aussi à la session : A. E. BAILEY, président du Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences, T. J. QUINN, sous-directeur du BIPM, T. J. WITT, F. DELAHAYE, D. REYMANN, T. ENDO (en stage au BIPM), G. LECLERC, métrologiste honoraire (BIPM).

Excusés :

Office Fédéral de Métrologie [OFMET], Wabern (W. SCHWITZ).
J. TERRIEN, directeur honoraire du BIPM.

Absent :

Institut National de Métrologie de la Roumanie [INM], Bucarest.

Le président du CCE et le directeur du BIPM souhaitent la bienvenue aux participants. Mr Vanier est nommé rapporteur. L'ordre du jour provisoire est adopté.

La plus grande partie de la journée du 16 septembre devant être consacrée à la discussion du point I de l'ordre du jour, « Effet Josephson », il est décidé que le point IV, « Rapport du Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences », sera discuté en premier le 17 septembre, avant d'entamer la discussion du point II, « Effet Hall quantique ».

I. Rapports des laboratoires

Les laboratoires nationaux ont présenté au CCE cinquante-neuf documents au total, dont la liste figure à l'annexe E 1. Compte tenu de la longueur et du nombre de ces documents ainsi que du peu de temps disponible lors de la session, il a été décidé que les contributions individuelles des laboratoires nationaux ne seraient pas exposées de façon formelle. Ces documents contenaient quantité d'informations concernant en particulier les points I et II, effet Josephson et effet Hall quantique respectivement, qui étaient les points principaux de l'ordre du jour. On a donc pensé qu'il serait plus commode de se référer aux tableaux et figures préparés par T. J. Witt et B. N. Taylor et présentés dans les annexes E 2 et E 3, qui compilent et résument les résultats disponibles de façon méthodique. Les résultats présentés sont la synthèse

des divers documents soumis au CCE ainsi que d'autres documents disponibles au moment de la compilation, comme, en particulier, les épreuves de manuscrits soumis pour publication dans les comptes rendus de la Conférence on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM) qui s'est tenue au NBS, Gaithersburg, du 23 au 27 juin 1986. Le président donne comme date limite le 18 septembre, date de clôture de la session, pour la soumission de nouveaux résultats à prendre en compte dans ces tableaux et figures.

Avant d'entamer la discussion du point I de l'ordre du jour, le président souligne l'importance des recommandations éventuelles du CCE relatives à l'adoption de valeurs du quotient fréquence-tension de l'effet Josephson et de la résistance de Hall quantifiée R_H de l'effet Hall quantique. En particulier, il souligne les répercussions importantes pour la science et l'industrie de changements comme celui qui est envisagé pour les valeurs des représentations nationales du volt. Il lui semble qu'il est plus important, lors du choix de valeurs particulières, de rechercher l'uniformité de la définition et de l'usage au niveau international, que d'être en accord parfait avec le SI.

2. Effet Josephson

Ce point de l'ordre du jour a été préparé par le document CCE/86-46 dont la première partie fait l'objet de l'annexe E 2 (p. E 111). Les numéros des tableaux et des figures qui sont mentionnés dans la suite renvoient à cette annexe.

Les tableaux E2-1 à E2-5 présentent un résumé d'une sélection de valeurs relatives à l'effet Josephson. Les figures E2-1 et E2-2 représentent sous forme graphique les résultats du tableau E2-2. Le tableau E2-1 donne les valeurs du quotient fréquence-tension adoptées par divers laboratoires nationaux. La diversité est évidente. Le tableau indique aussi les incertitudes* estimées par les divers laboratoires nationaux pour leurs meilleures mesures de la force électromotrice d'une pile étalon en fonction de la valeur qu'ils ont adoptée pour ce rapport. On a souligné qu'il était souvent possible d'obtenir une incertitude relative meilleure que 1×10^{-7} .

Le tableau E2-2 présente un résumé des résultats des déterminations de $2e/h$ en unités du SI. Les résultats ne sont pas tous indépendants. Les résultats des points 3 à 8 sont obtenus à partir du volt ou de l'ampère. Ceux des points 9 à 17 sont obtenus à partir de combinaisons diverses des constantes fondamentales et sont indépendants des mesures électriques précédentes.

* Toutes les incertitudes dans ce rapport sont données sous forme d'un écart-type.

Le tableau donne l'écart relatif Δ entre la valeur du quotient fréquence-tension précédemment recommandée par le CCE et chaque résultat :

$$\Delta = \left[\frac{483\,594 \text{ GHz/V} - 2e/h}{2e/h} \right] \times 10^6.$$

Pour apprécier plus aisément l'accord entre les diverses déterminations de $2e/h$, la figure E2-1 présente sous forme graphique, dans l'ordre du tableau E2-2 en partant du bas, les dix-sept valeurs de Δ accompagnées de leurs incertitudes. La ligne verticale en pointillé sur la gauche correspond à la valeur recommandée par CODATA en 1986. La figure E2-2 représente, à plus grande échelle, la valeur de $2e/h$ recommandée en 1986 par CODATA et cinq des valeurs les plus exactes, essentiellement indépendantes, du tableau E2-2. En particulier, elle comprend, en partant du bas, les points 3, 4, 11, 9 et 10 combinés, et 12.

La moyenne pondérée et l'écart-type de ces cinq mesures, indiqués respectivement par les lignes verticales en pointillé et en continu, sont les suivants :

$$\begin{aligned} 2e/h &= (483\,597,786 \pm 0,086) \text{ GHz/V} \\ &= 483\,594 [1 + (7,83 \pm 0,18) \times 10^{-6}] \text{ GHz/V.} \end{aligned}$$

Le tableau E2-3 a été préparé par Mr Witt pour donner une idée de l'amélioration attendue de l'exactitude de la détermination de $2e/h$ dans l'avenir, avec l'incertitude approximative et la date prévues. D'après ce tableau et les commentaires des participants lors de la session du CCE, il semble que l'on peut espérer disposer prochainement de nouvelles valeurs de bonne exactitude. Ces nouvelles valeurs devraient contribuer à mieux préciser la valeur de $2e/h$ en unités SI.

Le tableau E2-4 présenté par Mr Witt indique les différences observées entre les étalons de tension fondés sur l'effet Josephson de quatre laboratoires. Dans ces expériences, c'est l'installation « Josephson » elle-même qui a été transportée. Dans tous les cas, on a noté que l'écart relatif entre les étalons de tension Josephson était au plus égal à $7,2 \times 10^{-8}$. Le tableau E2-5 donne une autre série d'observations de différences entre les étalons de tension Josephson utilisés dans divers laboratoires, les comparaisons étant réalisées par transport de piles étalons ou d'étalons à diode de Zener. Les résultats de la colonne 5 montrent que des divergences allant jusqu'à $0,68 \mu\text{V}$ ont été obtenues entre les différences observées et les différences attendues entre les représentations nationales du volt. De plus, les résultats montrent une assez grande dispersion. En admettant que les incertitudes dans les réalisations des étalons fondés sur l'effet Josephson données au tableau E2-1 sont correctes, on doit en conclure que, dans ce cas, les différences et la dispersion sont dues à l'instabilité des étalons de transfert.

La figure E2-3 et le tableau E2-6 fournissent des résultats complémentaires relatifs aux étalons de transfert, fondés sur des expériences réalisées au NBS avec des piles étalons ou des diodes de Zener. La figure E2-4 donne des informations supplémentaires sur la dérive observée sur deux étalons de tension à diode de Zener.

La présentation de ces résultats a fait l'objet d'une longue discussion. Une des principales conclusions est que dans les comparaisons internationales de représentations nationales du volt par des méthodes autres que le transfert d'une installation Josephson, il faut s'attendre à une dispersion de l'ordre de $0,5 \times 10^{-6}$. Ces tableaux indiquent, outre les résultats de la comparaison d'étalons fondés sur l'effet Josephson, l'exactitude que l'on peut attendre des services d'étalonnage. Après une longue discussion sur la possibilité de recommander des procédures de transfert ou de nouvelles comparaisons, le CCE s'accorde, à l'unanimité, pour proposer au CIPM la Recommandation E 1 (1986) (voir p. 16).

La récente disponibilité, toutefois limitée, de réseaux de jonctions Josephson, a suscité beaucoup d'intérêt chez les participants. Ces réseaux, qui opèrent à une fréquence de 70 à 96 GHz, produisent des tensions de sortie de 1 volt, ce qui résoud plusieurs problèmes rencontrés lorsqu'on utilise des étalons à une seule jonction. À présent, grâce à ces réseaux, le NBS est capable d'obtenir une répétabilité durant trois semaines de 17 nV dans la mesure d'une tension de 1,018 V d'un étalon de référence à diode de Zener. Toutefois, il existe une différence relative systématique et inexpliquée de $1,3 \times 10^{-7}$ entre l'ancien étalon Josephson à jonction double et le nouvel étalon à réseau de jonctions (Document CCE/86-29). D'autres délégués ont décrit leurs progrès dans ce domaine (PTB, voir Document CCE/86-53, et ETL, voir Documents CCE/86-39 et 86-40). Ils semblent tous très optimistes quant à l'avenir de ces étalons. On a fait remarquer que les réseaux de jonctions Josephson devraient, en principe, pouvoir être aisément transférés et devraient faciliter la comparaison des représentations nationales du volt entre les divers laboratoires. Le principal problème qui subsiste est la disponibilité réduite de ces réseaux. Le NBS semble être en mesure de fournir des échantillons aux laboratoires nationaux à des fins de recherche scientifique, et les membres ont été informés que les réseaux pourraient être bientôt disponibles en plus grande quantité. Le BIPM aura un réseau de jonctions Josephson dans un proche avenir, et il aimerait être en mesure d'être le laboratoire pilote pour les comparaisons d'ici à 1988.

La question de l'adoption d'une nouvelle valeur pour le quotient fréquence-tension a suscité une longue discussion. Bien que cette question concerne les constantes fondamentales, on a souligné qu'il n'était pas nécessaire que la valeur adoptée soit exactement égale à celle de $2e/h$. Le CCE est surtout concerné par l'adoption d'une valeur qui puisse être utilisée dans le monde entier pour la conservation, la dissémination et l'étalonnage des représentations du volt. Cette nouvelle valeur ne devrait pas être modifiée dans un proche avenir. Les nouvelles

déterminations de $2e/h$ et les perfectionnements des expériences en cours ont été chaudement encouragés par le comité. On avait le sentiment que ces perfectionnements confirmeraient les résultats actuels en améliorant l'exactitude. Ensuite, la discussion s'est portée sur les conséquences pratiques d'un changement de valeur des représentations du volt aussi important que le laissent présager les résultats actuels. Au vu de l'importance des changements prévus, de nombreux délégués ont suggéré qu'un temps suffisamment long soit laissé aux laboratoires pour préparer le changement.

De nombreuses suggestions relatives à l'adoption d'une nouvelle valeur du quotient fréquence-tension ont été présentées. Un vote à titre consultatif a été proposé sur les deux approches suivantes :

1) proposer une nouvelle valeur du quotient fréquence-tension lors de la présente session du CCE et procéder au vote,

2) décider de réunir le comité en septembre 1988 avec l'intention d'adopter une nouvelle valeur pour le rapport fréquence-tension, qui prendra effet à compter de 1990.

Quatre laboratoires étaient favorables à la première solution, et onze à la seconde.

À la suite de quoi, la déclaration suivante (déclaration 1986/1, au sujet de la représentation du volt au moyen de l'effet Josephson) a été adoptée à l'unanimité :

« Le Comité Consultatif d'Électricité

constate

— que l'une de ses responsabilités, en tant qu'organe de la Convention du Mètre, est d'assurer la diffusion et l'amélioration du SI, système d'unités universel,

— que l'uniformité mondiale et la constance à long terme des représentations nationales du volt sont d'une importance majeure pour le commerce et l'industrie, du point de vue technique comme du point de vue économique,

— que de nombreux laboratoires nationaux utilisent l'effet Josephson pour conserver une représentation très stable du volt mais qu'ils n'utilisent pas tous la même valeur pour le quotient de la fréquence par la tension,

— que la valeur de ce quotient donnée par le CCE en 1972 (483 594,0 GHz/V), valeur que la plupart de ces laboratoires nationaux utilisent pour conserver leur représentation du volt, est maintenant reconnue comme inexacte,

— que divers laboratoires ont réalisé directement le volt ou bien déterminé des valeurs des constantes physiques qui peuvent fournir indirectement une valeur de $2e/h$ en unités SI,

— que d'autres laboratoires nationaux doivent terminer sous peu des réalisations et déterminations analogues,

estime

— que la valeur du quotient « fréquence/tension » utilisée pour conserver une réalisation du volt à l'aide de l'effet Josephson doit être en accord avec le SI,

— qu'une nouvelle valeur, en meilleur accord avec le SI, pourra bientôt être adoptée pour l'usage de tous les laboratoires,

— que cette valeur devrait être adoptée simultanément dans tous les pays concernés.

En conséquence, le Comité Consultatif d'Électricité

— crée un groupe de travail chargé de proposer une nouvelle valeur au CCE d'après toutes les données qui seront disponibles avant le 15 juin 1988,

— décide de se réunir en septembre 1988 afin de recommander la nouvelle valeur de ce quotient qui entrera en vigueur au 1^{er} janvier 1990,

— annonce que cette nouvelle valeur sera vraisemblablement supérieure à la valeur actuelle d'environ 8×10^{-6} en valeur relative.

De plus, le Comité Consultatif d'Électricité

— recommande que les laboratoires nationaux poursuivent activement leurs travaux en vue de la réalisation du volt, de la comparaison de ces réalisations et de la détermination des constantes en question, et communiquent sans délai tous leurs résultats au groupe de travail,

— recommande que les laboratoires ne modifient pas la valeur qu'ils utilisent jusqu'ici pour le quotient de la fréquence par la tension, jusqu'à ce que la nouvelle valeur entre en vigueur,

— estime que la valeur qui sera adoptée sera suffisamment exacte par rapport au SI pour qu'aucun autre changement ne soit nécessaire dans l'avenir prévisible. »

Enfin, un groupe de travail appelé « Groupe de travail sur l'effet Josephson » a été formé. Il est chargé de proposer au CCE une nouvelle valeur du rapport fréquence-tension fondée sur toutes les valeurs disponibles, avant le 15 juin 1988. Les membres de ce Groupe de travail sont MM. B. N. Taylor (NBS), T. J. Witt (BIPM), B. P. Kibble (NPL) et R. Kaarls (VSL).

3. Effet Hall quantique

L'adoption éventuelle d'une valeur pour la résistance de Hall quantifiée R_H a été longuement discutée. (Pour éviter la confusion, la grandeur déterminée de façon expérimentale à l'aide de l'effet Hall quantique est représentée par le symbole R_H et appelée la résistance de Hall quantifiée, de façon à la distinguer clairement de la constante physique h/e^2 obtenue à partir des constantes fondamentales ou par d'autres moyens.) Par commodité, ce sujet sera traité en trois parties dans ce rapport. MM. Taylor et Witt ont préparé des tableaux et figures récapitulatifs faisant le point sur la question (voir Annexe E 3, p. E 122). Les paragraphes ci-dessous résument les commentaires présentés, les questions posées et les explications données au cours de la session.

a) R_H exprimée en fonction des représentations nationales de l'ohm (Point II.A de l'ordre du jour)

Ce point traite de l'aptitude d'un laboratoire donné à mesurer R_H en fonction de sa représentation de l'ohm ($\Omega_{t,lab}$). Les valeurs données au tableau E3-1 sont les différences relatives Δ , avec leur incertitude ε , entre la valeur de R_H exprimée en fonction de la représentation de l'ohm considérée (Ω_{Lab} , Ω_{69-B1}) à la date t et la valeur de référence de 25 812,8 fois cette même « unité ». Dans ce tableau, les valeurs correspondant à la représentation Ω_{Lab} à la date de la mesure sont données dans la troisième colonne intitulée « Δ et ε de R_H en fonction de Ω_{Lab} (à la date t) ». Les différences des valeurs de Δ des divers laboratoires proviennent essentiellement des valeurs des représentations de l'ohm conservées par ces laboratoires. Pour les laboratoires qui maintiennent Ω_{Lab} sous forme de groupes de résistances étalons, l'incertitude relative de la mesure de R_H en fonction de Ω_{Lab} varie de 2×10^{-8} à 15×10^{-8} , en tenant compte des incertitudes composantes de type A et de type B.

b) Comparaisons de Ω_{Lab} (Points II.C.1 et II.C.4 de l'ordre du jour)

Les comparaisons internationales de Ω_{Lab} affectent directement l'accord entre les laboratoires pour la détermination de R_H . L'annexe E 3 résume ces valeurs sous forme de graphiques et de figures.

Les résultats de la 14^e comparaison d'étalons nationaux de résistance sont résumés au tableau E3-2 où Ω_{Lab} est rapporté à Ω_{69-B1} . La figure E3-1 présente un histogramme de la dispersion par rapport à la moyenne des différences $\Omega_{Lab} - \Omega_{69-B1}$, différence obtenue pour chaque étalon de transfert participant à l'une ou l'autre des deux comparaisons internationales les plus récentes qui ont eu lieu au BIPM. On peut en conclure que l'aptitude actuelle à transférer Ω_{Lab} au moyen d'étalons de transfert de 1 Ω se caractérise par une incertitude relative aléatoire de l'ordre de 5×10^{-8} . Il n'est pas tenu compte des incertitudes de type B, telles que celles dues à la température, à la puissance, à la pression ou aux courants de fuite.

Les comparaisons effectuées au BIPM permettent d'évaluer la différence entre Ω_{Lab} tel qu'il est conservé par différents laboratoires et les déterminations de l'ohm. Ces valeurs sont aussi représentées dans divers tableaux et figures de l'annexe E 3.

Le tableau E3-3 donne une évaluation de Ω_{69-B1} au 1^{er} janvier 1986 en fonction de l'ohm déterminé par les laboratoires qui ont réalisé un condensateur calculable. Ces résultats apparaissent aussi sous forme de graphique (Fig. E3-2). On a discuté de la dérive réelle de Ω_{Lab} que l'on doit utiliser pour réduire les valeurs d'une date à une autre. La dérive dépend dans une certaine mesure des points particuliers pris en compte dans le calcul. De plus, les laboratoires peuvent réévaluer leur dérive (par exemple par pondération). La présence d'un élément fonction du

temps dans la dérive a été discutée, mais certains participants étaient sceptiques quant à l'importance d'un tel effet. La valeur de la dérive des différents laboratoires est présentée aux tableaux E3-4a et E3-4b.

Enfin, il est possible de combiner les résultats des déterminations de l'ohm, en particulier ceux du CSIRO (NML), aux résultats des comparaisons figurant au tableau E3-2 pour évaluer le comportement de Ω_{69-91} en fonction du temps. Les valeurs de Ω_{69-91} déduites de cette façon apparaissent sur le graphique de la figure E3-3. La droite a été calculée par la méthode des moindres carrés, avec pondération, appliquée aux valeurs déduites des déterminations de l'ohm au CSIRO (NML) depuis 1964. Des explications détaillées sur les valeurs révisées de l'ohm réalisé au CSIRO (NML) sont données dans le document CCE/86-13. Une deuxième révision fondée sur un calcul avec pondération paraîtra dans les comptes rendus de la CPEM-86.

La précision relativement bonne que l'on obtient par transport d'étalons de 1Ω permet une comparaison indirecte des réalisations de la résistance de Hall quantifiée R_H exprimées en fonction des représentations nationales de l'ohm et de sa reproductibilité d'un laboratoire à l'autre. La cinquième colonne du tableau E3-1 intitulée « Δ et ε de R_H en fonction de Ω_{69-91} au 1986-01-01 » donne une indication de cette reproductibilité. Les mêmes valeurs se retrouvent sur la figure E3-4 qui illustre cette reproductibilité, la référence commune étant la valeur de Ω_{69-91} au 1986-01-01. L'écart-type pondéré de la moyenne est de $0,04 \mu\Omega$.

c) R_H en unités SI (Points II.B.1 et II.B.2 de l'ordre du jour)

Les déterminations de R_H , exprimées en unités SI, dans les différents laboratoires sont résumées au tableau E3-5 et illustrées sur la figure E3-5. Quatre laboratoires (CSIRO, ETL, LCIE, NPL) ont fourni les résultats de mesures indépendantes directes de R_H en ohms au moyen de l'effet Hall quantique et d'un condensateur calculable. La dispersion relative totale de ces quatre résultats est de l'ordre de 3×10^{-7} . D'un autre côté, la différence entre la valeur de h/e^2 de 1986 de CODATA et R_H obtenue à partir des mesures directes les plus précises (NML/CSIRO et NPL) est un peu meilleure, de l'ordre de 2×10^{-7} environ (voir tableau E3-6 et Fig. E3-6). (On notera que le point 8 du tableau E3-6 est affecté de la plus petite incertitude, et qu'il est utilisé comme point de référence sur la figure E3-6 pour tracer les droites en pointillé et en continu). Les perspectives de déterminations absolues à venir de R_H et h/e^2 par les différents laboratoires sont résumées au tableau E3-7.

Les résultats des mesures des étalons de travail des laboratoires nationaux et des étalons voyageurs de capacité sont présentés afin de montrer l'aptitude actuelle à conserver et comparer des condensateurs qui pourraient, grâce aux ponts d'impédance, être utilisés pour conserver et comparer des étalons de résistance. Le tableau E3-8 résume les

résultats de la troisième comparaison internationale des représentations nationales du farad (voir aussi Annexe E4). Bien que ces résultats fassent apparaître des différences importantes entre les diverses représentations du farad, l'accord entre les laboratoires qui réalisent l'ohm au moyen d'un condensateur calculable (voir Fig. E3-2) est satisfaisant, la dispersion relative étant de l'ordre de 1×10^{-7} . La figure E3-7, qui indique sur près de 20 ans le comportement comparé de trois étalons voyageurs de 10 pF fabriqués au NBS, montre qu'il est possible de prédire la valeur relative de ces étalons à $5,5 \times 10^{-8}$ près ou mieux. L'histogramme de la figure E3-8 donne la dispersion des résultats de la détermination de $F_{\text{Lab}} - F_{\text{NBS}}$ et l'écart-type relatif associé de $7,5 \times 10^{-8}$. En comparant cet écart-type avec l'écart-type relatif de $4,5 \times 10^{-8}$ associé aux résistances (Fig. E3-1), il ressort que les comparaisons de résistance ont une exactitude relative plus élevée. Ceci fait le point sur la situation actuelle de l'ohm et de R_H et sur l'aptitude à comparer les étalons correspondants.

Les mêmes questions que pour l'effet Josephson ont été soulevées. En particulier, quelle exactitude doit-on atteindre pour pouvoir adopter une valeur de R_H en unités SI? Il devint clair au cours de la discussion que, comme c'est le cas pour l'effet Josephson, on recherche tout d'abord l'uniformité internationale, la reproductibilité et un usage largement admis. De nombreux participants pensent toutefois que plusieurs questions devraient trouver une réponse avant l'adoption d'une valeur pour R_H . En particulier, les points suivants ont été abordés : la disponibilité de « bons » échantillons et leur évolution dans le temps, la caractérisation des échantillons, les critères à utiliser pour déterminer si un échantillon est bon ou pas, les variations de R_H en fonction de la température, du matériau utilisé, de la concentration et de la mobilité des porteurs, les erreurs éventuelles dues au redressement au niveau des contacts et les effets du positionnement des électrodes de Hall sur les résultats, etc. Ces considérations sont traitées en détail dans les documents CCE/86-16, CCE/86-28, CCE/86-35, CCE/86-36 et CCE/86-52.

Considérant que de nouvelles expériences pourraient permettre bientôt de répondre à ces questions, et que la relation physique exacte entre R_H et h/e^2 pourrait être mieux comprise dans un proche avenir, on a considéré qu'il valait mieux ne pas recommander d'adopter maintenant une valeur pour R_H . La déclaration suivante (déclaration 1986/2, au sujet de la représentation de l'ohm au moyen de l'effet Hall quantique) a été adoptée à l'unanimité :

« Le Comité Consultatif d'Électricité

constate

— que l'une de ses responsabilités, en tant qu'organe de la Convention du Mètre, est d'assurer la diffusion et l'amélioration du SI, système d'unités universel,

— que l'uniformité mondiale et la constance à long terme des représentations nationales de l'ohm sont d'une importance majeure pour le commerce et l'industrie, du point de vue technique comme du point de vue économique,

— que de nombreux laboratoires nationaux étudient activement la mise en œuvre de l'effet Hall quantique comme moyen de conserver une représentation stable de l'ohm,

— que cette méthode fournit des résultats très reproductibles d'un laboratoire à l'autre, mais que le nombre d'échantillons utilisables est insuffisant pour satisfaire les besoins actuels,

— que l'expérience conduit à disposer de contrôles qui permettent de garantir l'obtention de résultats à la fois reproductibles et exacts à l'aide d'un échantillon convenablement choisi,

— qu'aucun laboratoire n'a encore adopté une valeur particulière de la résistance de Hall quantifiée R_H pour conserver sa représentation de l'ohm,

— que divers laboratoires ont déterminé la valeur de R_H en unités SI en utilisant aussi bien le condensateur calculable que les déterminations des constantes physiques fondamentales,

— que de nouvelles déterminations de cette valeur devraient être disponibles prochainement,

estime

— qu'une même valeur de R_H devrait être adoptée simultanément par tous les laboratoires qui décideront de l'utiliser comme représentation de l'ohm,

— que cette valeur devra être en accord avec le SI,

— qu'une telle valeur pourra être adoptée prochainement.

En conséquence, le Comité Consultatif d'Électricité

— *crée* un groupe de travail chargé de proposer une valeur de R_H au CCE d'après toutes les données qui seront disponibles avant le 15 juin 1988 et d'établir des instructions détaillées pour l'utilisation correcte de l'effet Hall quantique en vue de conserver une représentation de l'ohm,

— *décide* de se réunir en septembre 1988 afin de recommander la valeur de R_H qui entrera en vigueur au 1^{er} janvier 1990,

— *annonce* que l'adoption de cette valeur pourra conduire à modifier la valeur attribuée aux représentations de l'ohm conservées dans les laboratoires nationaux et au BIPM, mais que cette modification ne devrait en général pas excéder 2×10^{-6} en valeur relative.

De plus, le Comité Consultatif d'Électricité

— *recommande* que les laboratoires nationaux

— poursuivent activement leurs travaux en vue d'améliorer les connaissances relatives à l'effet Hall quantique,

— activent la production et la distribution d'échantillons appropriés de semi-conducteurs,

— déterminent la valeur de R_H en unités SI en s'appuyant aussi bien sur la réalisation de l'ohm que sur la détermination des constantes fondamentales appropriées,

— effectuent si nécessaire des comparaisons bilatérales et communiquent sans délai leurs résultats au groupe de travail,

— *recommande* que le BIPM organise en 1987-1988 une comparaison internationale d'étalons de résistance de un ohm en rapport avec les travaux sur l'effet Hall quantique,

— *recommande* qu'aucun laboratoire n'adopte une valeur de R_H pour établir sa représentation de l'ohm ni n'utilise l'effet Hall quantique pour modifier la dérive actuelle de sa représentation de l'ohm jusqu'à ce que la valeur recommandée entre en vigueur,

— *estime* que la valeur qui sera recommandée en 1988 sera suffisamment exacte, par rapport au SI, pour qu'aucun changement ne soit nécessaire dans l'avenir prévisible. »

À l'appui de cette déclaration, le CCE a été unanime pour proposer au CIPM la Recommandation E 2 (1986) (*voir* p. E 17).

Un groupe de travail intitulé « Groupe de travail sur l'effet Hall quantique » a été créé. Sa mission est de proposer au CCE une valeur de R_H fondée sur tous les résultats disponibles avant le 15 juin 1988. Ses membres sont MM. B.N. Taylor (NBS), F. Delahaye (BIPM), T. Endo (BIPM/ETL), V. Kose (PTB), O.C. Jones (NPL) et B.M. Wood (NRC).

En réponse à une question concernant les mesures à prendre vis-à-vis des laboratoires qui ne sont pas équipés pour réaliser R_H ou l'étalon Josephson, il a été suggéré que ces laboratoires soient invités à tenir compte des changements que pourront entraîner l'adoption d'une nouvelle valeur du rapport fréquence-tension et d'une valeur pour R_H à la date mentionnée dans la future recommandation. Ces laboratoires ont été, en outre, encouragés à utiliser les services d'étalonnage et de certification du BIPM si nécessaire.

4. État d'avancement des comparaisons internationales

4.1. BIPM : étalons de capacité de 10 pF (Document CCE/86-2)

Cette comparaison est achevée ; les résultats sont publiés dans le Document CCE/86-2 (*voir* Annexe E 4, p. E 36).

4.2. BIPM : rapport de la 14^e comparaison d'étalons nationaux de résistance (Document CCE/86-1)

Cette comparaison est achevée. Les résultats sont publiés dans le Document CCE/86-1 (*voir* Annexe E 5, page 42).

4.3. VSL : étalons de transfert courant alternatif/courant continu (Document CCE/86-59)

Le circuit d'Europe de l'ouest est achevé. Aucun résultat n'a été publié à ce jour car la comparaison internationale n'est pas terminée. Le prochain circuit comprend l'ETL, le NIM, le CSIRO (NML), le NBS, le NRC, l'IMM et l'ASMW.

4.4. PTB : mesures de puissance électrique en courant alternatif (Document CCE/86-54)

La comparaison est achevée. Les résultats font l'objet du Document CCE/86-54 (*voir* Annexe E 6, page E 60) et seront publiés prochainement dans *Metrologia*.

4.5. PTB : Inductance

La comparaison, pour des raisons diverses, a été effectuée sur une très petite échelle. Bien que le nombre de participants ait été limité, on a obtenu des résultats intéressants. Les étalons voyageurs sont toujours disponibles. Un rapport sera publié d'ici peu.

5. Rapport du Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences (GTRF)

Le président du groupe de travail (A. E. Bailey) présente le rapport de ce groupe (Document CCE/86-47, *voir* p. E 18) qui s'est réuni au Bureau International des Poids et Mesures les 10 et 11 septembre 1986. Le rapport donne la liste des comparaisons achevées depuis la dernière session du GTRF, des comparaisons en cours, des nouvelles comparaisons qui vont être entreprises prochainement, et des sujets possibles pour de nouvelles comparaisons. Parmi ces nouvelles comparaisons, les comparaisons 86-4 et 86-5 qui traitent des fibres optiques, devront faire l'objet d'une entente du Comité Consultatif d'Électricité avec le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie, par l'intermédiaire du BIPM. Des comparaisons jusqu'à 1,5 GHz sont recommandées. La prochaine session du GTRF est prévue pour 1988.

Le président remercie Mr Bailey pour la présentation de son rapport et encourage la publication des résultats des comparaisons dans la littérature scientifique. Il lui semble que le Groupe de travail est un peu trop ambitieux dans ses projets, et il aimerait qu'il soit plus sélectif dans le choix des comparaisons. Le président suggère d'envoyer à tous les laboratoires participants le document sur les méthodes de comparaison,

qui a été très apprécié. Il remarque aussi que les résultats des comparaisons sont meilleurs que par le passé, mais qu'il est encore possible de faire mieux. Il suggère d'étudier les résultats obtenus au cours des vingt dernières années. Mr Bailey approuve et ajoute qu'il compte préparer un rapport sur ce thème dans l'avenir. Il suggère que, pour toutes les questions qui relèvent de la compétence du GTRF, les personnes mentionnées dans le rapport 1986 du GTRF servent de contacts. Enfin, il propose formellement que le NIM (Beijing, Chine) et le VSL (Delft, Pays-Bas) deviennent membres à part entière du GTRF. Ces laboratoires ont été jusqu'à présent invités, alors que leur participation était celle de membres à part entière. Cela simplifiera les choses. Le CCE approuve.

Le président annonce que Mr Bailey, qui a pris sa retraite du NPL depuis plusieurs années, l'a informé de son intention de quitter la présidence du GTRF. Le président remercie Mr Bailey pour les très nombreux services qu'il a rendus au Groupe de travail pendant de nombreuses années, et demande qu'il figure sur la liste des personnes invitées au GTRF. Il nomme Mr Érard (LCIE) nouveau président du GTRF.

6. Travaux du BIPM

T. J. Witt, responsable de la section d'Électricité du BIPM, expose les travaux effectués dans cette section, et en particulier : le projet de travaux sur les réseaux de jonctions Josephson qui remplaceront l'équipement actuel vieillissant, la poursuite des étalonnages de piles et les comparaisons à l'aide du comparateur automatique, les comparaisons internationales utilisant des diodes de Zener à 10 et 1,018 volts, le travail sur le comparateur cryogénique de courants pour les comparaisons d'étalons de $1\ \Omega$ et plus généralement d'étalons dans le rapport 1 : 1, 1 : 10 ou 1 : 100, l'étude de l'effet Hall quantique avec différents échantillons et son utilisation pour la mesure de la dérive de $\Omega_{69,91}$. Le travail sur la mise en œuvre de résistances étalons de 10 k Ω et leur évolution dans le temps est aussi mentionné, ainsi que les projets d'automatisation des mesures à 10 k Ω et d'étude des coefficients de puissance. Enfin, Mr Witt rappelle que le BIPM effectue des étalonnages et des comparaisons d'étalons de capacité, bien qu'il n'ait pas de condensateur calculable, et qu'il maintient une activité modeste dans le domaine des étalons de transfert courant alternatif/courant continu.

Le président remercie Mr Witt pour son rapport.

7. Comparaisons internationales prévues

On a discuté des comparaisons internationales qui pourraient aider à résoudre certains problèmes, en particulier dans le domaine des étalons de tension et de résistance. La discussion sur les étalons de tension a conduit à la Recommandation E 1 (1986). Compte tenu de l'importance des données concernant les réalisations de l'ohm conservées par les laboratoires, en vue de la session de 1988, il a été prévu de faire une comparaison de résistances de $1\ \Omega$. Toute information sur chaque résistance qui participera à la comparaison devra être communiquée au BIPM, une connaissance étendue des caractéristiques augmentant normalement l'exactitude. Des propositions de comparaisons internationales à grande échelle de résistances de $6\ 453\ \Omega$, $12\ 906\ \Omega$ et $10\ \text{k}\Omega$ ont reçu un accueil réservé, ces résistances voyageant moins bien que les résistances de $1\ \Omega$ et aussi parce qu'on dispose aujourd'hui de méthodes permettant de déterminer avec exactitude le rapport de deux résistances. Toutefois, on a encouragé des comparaisons bilatérales à ces valeurs.

Il a été décidé de laisser pour le moment les comparaisons d'étalons de capacité de $10\ \text{pF}$ aux soins des laboratoires nationaux concernés.

Enfin, il a été suggéré avec insistance que les laboratoires fassent part au BIPM des résultats obtenus dans le cadre des comparaisons bilatérales en général et qu'ils les publient afin de les porter à la connaissance de tous.

8. Questions diverses

Mr Quinn a fait un bref rapport sur le changement à venir de l'Échelle internationale pratique de température de 1968 (E IPT-68). Il a souligné que cette échelle était fondée sur la thermométrie à gaz des années 1950 et 1960, dont les inexactitudes sont significatives. Les changements attendus sont à longue portée. Des corrections de l'ordre de $5\ \text{mK}$ à $20\ ^\circ\text{C}$, de $30\ \text{mK}$ à $100\ ^\circ\text{C}$ et de $0,5\ \text{K}$ à $800\ ^\circ\text{C}$ sont attendues. Ces changements sont importants pour le CCE compte tenu que les valeurs des éléments sensibles aux variations de température devront être corrigées en conséquence ou faire l'objet d'un nouvel étalonnage. Par exemple, les tables des thermocouples devront être vérifiées. Il a été suggéré que les changements des représentations du volt et de l'ohm devraient être faits en même temps que le changement de l'échelle de température. La date exacte de ce changement sera connue en 1988, et l'E IPT pourrait être modifiée en 1990 ou 1991.

Recommandations
du Comité Consultatif d'Électricité
présentées
au Comité International des Poids et Mesures

Transfert du volt

RECOMMANDATION E 1 (1986)

Le Comité Consultatif d'Électricité,

constatant

— que la dissémination du volt et les comparaisons internationales des réalisations du volt sont faites traditionnellement à l'aide de piles étalons du type Weston et depuis peu aussi à l'aide d'étalons à diode de Zener,

— que, d'après les résultats actuellement disponibles, la stabilité de ces étalons est insuffisante pour garantir en toutes circonstances l'exactitude souhaitable du transfert du volt,

— que l'incertitude qui en résulte est excessive, comparée à la stabilité des représentations du volt conservées à l'aide de l'effet Josephson,

recommande

— que tous les laboratoires qui participent à des comparaisons de leurs représentations du volt, comparaisons bilatérales ou multilatérales, nationales ou internationales, communiquent au BIPM les résultats de ces comparaisons afin que le BIPM puisse les compiler et les publier, pour qu'ils soient évalués tous ensemble,

— que tous les laboratoires concernés poursuivent activement l'étude et l'amélioration des étalons transportables permettant le transfert du volt d'un laboratoire à un autre, piles étalons du type Weston, étalons à diode de Zener ou dispositifs transportables à jonctions de Josephson.

Au sujet de l'effet Hall quantique

RECOMMANDATION E 2 (1986)

Le Comité Consultatif d'Électricité

considérant

la déclaration 1986/2 et en particulier

— la connaissance imparfaite des divers aspects théoriques et expérimentaux de l'effet Hall quantique,

— le nombre insuffisant d'échantillons de semi-conducteurs disponibles pour mettre en œuvre l'effet Hall quantique,

recommande

— de poursuivre activement les études relatives à la fabrication et à la caractérisation des échantillons de semi-conducteurs appropriés,

— d'encourager les industries et les laboratoires de recherche à produire les échantillons de semi-conducteurs de haute qualité nécessaires pour l'utilisation métrologique de l'effet Hall quantique,

— d'approfondir la compréhension de l'effet Hall quantique dans ses aspects théoriques comme dans ses aspects pratiques,

— d'effectuer, sous le patronage du BIPM, des comparaisons des dispositifs utilisant l'effet Hall quantique.

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 septembre 1986.

Étaient présents : Mr A. E. BAILEY, président, MM. E. BAVA (IEN), XI DEXIONG (NIM), L. ÉRARD (LCIE), E. GRIFFIN (RSRE), C. HARMANS (VSL), I. K. HARVEY (CSIRO), A. JURKUS (NRC), D. H. RUSSEL (NBS, Boulder), K. SHIDA (ETL), U. STUMPER (PTB), R. W. YELL (NPL).

Le directeur du BIPM, P. GIACOMO.

Assistaient aussi à la réunion : MM. J. TERRIEN, directeur honoraire du BIPM ; T. ENDO, G. LECLERC, A. SATRAPINSKY et T. J. WITT (BIPM).

Excusé : le représentant de l'ASMW.

Absents : les représentants de l'IRT et de l'IMM.

Aucun représentant de l'URSI n'a participé à la réunion.

Le Groupe de travail exprime sa tristesse à l'annonce du décès de G. Almassy, survenu depuis la dernière réunion, et sa reconnaissance pour ses travaux comme représentant de l'IRT.

Le président et le directeur du BIPM souhaitent la bienvenue aux participants, puis l'ordre du jour distribué en séance est adopté.

Mr Érard est nommé rapporteur.

1. Comparaisons internationales terminées depuis la dernière session du Groupe de travail (mars 1983)

Six comparaisons sont terminées : elles sont détaillées dans le tableau I.

2. Comparaisons en cours d'achèvement

Le point sur ces trois comparaisons, terminées mais pour lesquelles les rapports finaux ne sont pas prêts, est donné dans le tableau II.

3. État d'avancement des comparaisons en cours

Le résumé de l'état d'avancement des comparaisons organisées en 1975, 1978 et 1983 est donné dans le tableau III.

4. Nouvelles comparaisons

Le Groupe de travail a examiné attentivement les propositions de nouvelles comparaisons. La double proposition de l'ASMW concernant les mesures de tension sur ligne coaxiale 50 Ω jusqu'à 1,5 GHz (document

GT-RF/86-9) n'a pas été retenue pour l'instant car elle coïncide pratiquement avec des comparaisons nouvellement terminées ou en cours (75-A5 et 75-A7).

Les nouvelles comparaisons approuvées par le Groupe de travail sont indiquées dans le tableau IV ; la liste des participants à chaque comparaison n'étant ni limitative ni close, tous les laboratoires intéressés sont invités à y prendre part après en avoir averti le BIPM.

5. Sujets éventuels de comparaisons futures

Le tableau V énumère quelques-uns des sujets de comparaisons possibles dans l'avenir. Si quelques laboratoires sont dès à présent intéressés par certains de ces sujets et organisent des comparaisons non officielles, le Groupe de travail souhaite recevoir les rapports finaux auxquels ces comparaisons donneront lieu.

6. Questions diverses

Le Groupe de travail souhaite qu'un document-guide sur la conduite des comparaisons, à l'usage du responsable des mesures à la fois en tant que laboratoire pilote ou simple participant, soit émis. Le projet sera préparé et soumis à l'approbation de chacun des participants au Groupe de travail.

7. Date de la prochaine réunion

Le Groupe de travail souhaite tenir sa prochaine réunion en 1989. La date exacte sera fixée dès que la date de la prochaine réunion du Comité Consultatif d'Électricité sera connue.

12 septembre 1986

Le Rapporteur
L. ÉRARD

Le Président
A. E. BAILEY

TABLEAU I

*Comparaisons terminées depuis la dernière session du Groupe de travail
(mars 1983)*

- 72-6 Puissance sur coaxial, à la fréquence de 6 GHz.
(Laboratoire pilote : NBS ; participants : CSIRO, NPL, LCIE, IEN, RIND, NRC, PTB, OMH).
Les résultats définitifs sont contenus dans le document GT-RF/86-6. Le NBS envisagera la publication des résultats dans *Electronics Letters*.
- 75-A1 Puissance à 15,0 GHz : efficacité de montures bolométriques sur guide d'ondes.
(Laboratoire pilote : PTB ; participants : LCIE, NBS, NRC, RSRE).
Les résultats complets sont contenus dans la monographie BIPM 84/3 et sont publiés dans la revue *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-35**, 1986, pp. 116-120.
- 75-A3 Affaiblissement à 15,0 GHz sur guide d'ondes.
(Laboratoire pilote : PTB ; participants : IEN, NBS, RSRE, OMH).
Les résultats définitifs sont résumés dans le document GT-RF/86-3 (Annexe E 8). Les résultats complets sont contenus dans la monographie BIPM 85/1 et dans *Metrologia*, **23**, 1986/87, pp. 121-127.
- 75-A5 Tension sur ligne coaxiale 50 Ω ; 1 V ; 100, 250, 500 et 1 000 MHz.
(Laboratoire pilote : PTB ; participants : ASMW, SESC, NBS, CSIRO, OMH, IMM).
Les résultats définitifs sont résumés dans le document GT-RF/86-5. Les résultats complets sont contenus dans la monographie BIPM 84/1 et publiés dans *Metrologia*, **20**, 1984, pp. 115-126.
- 75-A12 Coefficient de réflexion à 10 GHz (en module).
(Laboratoire pilote : RSRE ; participants : ETL, IEN, NBS, CSIRO, NRC).
Cette comparaison était déjà terminée en mars 1983 (document GT-RF/83-8), les résultats complets sont contenus dans la monographie BIPM 84/2 et publiés dans *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-34**, 1985, pp. 463-466.
- 78-8 Puissance de crête laser (10,6 μm).
(Participants : NBS, NPL).
Les résultats définitifs sont contenus dans le document GT-RF/86-1 (Annexe E 9). Aucune autre publication n'est prévue.

TABLEAU II

Comparaisons en cours d'achèvement

- 72-1 Déphasage sur guide d'ondes R 100, aux fréquences 9,0, 10,0 et 11,2 GHz.
(Laboratoire pilote : NBS ; participants : ETL, CSIRO, RSRE ; l'IEN s'est retiré de cette comparaison).
Tous les laboratoires ont terminé leurs mesures. Le NBS préparera très prochainement le rapport final ; une publication, monographie du BIPM, est suggérée.
- 78-11 Impédance sur ligne coaxiale à 100, 200 et 300 MHz (connecteur GR900).
(Laboratoire pilote : RSRE ; participants : PTB, NBS, CSIRO, VSL).
Tous les laboratoires ont terminé leurs mesures. Le RSRE prépare le rapport final (document GT-RF/86-12).
- 78-14 Puissance (1 mW) à 50 MHz sur ligne coaxiale 50 Ω .
(Laboratoire pilote : NRC ; participants : PTB, NBS, ETL, CSIRO, LCIE, IEN, NPL, VSL, FFV, OMH).
Tous les laboratoires ont terminé leurs mesures. Le NRC prépare le rapport final et une publication dans *IEEE Trans. Instrum. Meas.* (document GT-RF/86-13).

TABLEAU III

Comparaisons en cours

a. Comparaisons abandonnées

Après examen de leur état d'avancement et de l'intérêt présenté, le Groupe de travail décide que les comparaisons suivantes devraient être abandonnées.

- 75-A8 Puissance de bruit à 30 MHz.
(Laboratoire pilote : CSIRO ; participants : NBS, RSRE).
- 78-10 Puissance surfacique à 10 GHz.
(Laboratoire pilote : NPL ; participants : LCIE, CSIRO, NBS, VSL, IEN).
Comparaison abandonnée sous cette forme, elle est reprise en partie, avec la comparaison 83-2, dans la comparaison 86-1.
- 78-12 Coefficient de surtension à 10 GHz ($1\ 000 < Q < 10\ 000$).
(Laboratoire pilote : RSRE ; participants : CSIRO, NPL, IEN).
- 83-1 Impédance sur une ligne coaxiale 50 Ω à 1 MHz et 50 MHz (connecteur GR900).
(Laboratoire pilote : VSL ; participants : PTB, NBS, NPL, CSIRO, SESC).
Comparaison abandonnée sous cette forme, elle est reprise dans la nouvelle comparaison 86-2.

- 83-2 Champ électrique en ultra-haute fréquence (fréquence préférentielle : 750 MHz, niveau voisin de 10 V/m).
(Laboratoire pilote : NPL ; participants : VSL, NBS, CSIRO, IEN).
Comparaison abandonnée sous cette forme, elle est reprise, avec la comparaison 78-10, dans la comparaison 86-1.

b. Comparaisons maintenues

- 75-A4 Facteur de réflexion à 500 MHz, 3 et 7 GHz sur coaxial 50 Ω .
(Laboratoire pilote : PTB ; participants : CSIRO, ETL, NBS, NRC, CSMU, OMH, RSRE, SNIIM, VSL).
Quatre laboratoires ont terminé leurs mesures. Le NIM désire participer à la comparaison uniquement pour les mesures à 500 MHz (document GT-RF/86-2).
- 75-A6 Tension sur ligne coaxiale 50 Ω , 100 V à 30 MHz.
(Laboratoire pilote : PTB ; participant : NBS).
Les mesures sont en cours au NBS. La comparaison doit se terminer prochainement (document GT-RF/86-2).
- 75-A7 Tension sur ligne coaxiale 50 Ω , 1 mV à 30 MHz.
(Laboratoire pilote : PTB ; participants : ASMW, CSIRO, NBS, NIM, OMH, TTL, VSL).
Quatre laboratoires ont effectué les mesures. La comparaison se poursuit (document GT-RF/86-2).
- 75-A11 Puissance sur ligne coaxiale à 12, 14 et 17 GHz : efficacité de montures bolométriques équipées de connecteurs de précision 7 mm (APC-7).
(Laboratoire pilote : PTB ; participants : CSIRO, IEN, LCIE, NBS, NRC, VSL).
Quatre laboratoires ont effectué les mesures. En raison de problèmes survenus aux étalons de transfert, la PTB fournira pour la suite de la comparaison un outil et des recommandations pour connexion au banc de mesure. Le NIM désire participer à cette comparaison vers la fin de 1987, le LCIE lui expédiera les étalons de transfert après mesure (document GT-RF/86-2).
- 75-A14 Affaiblissement à 300 MHz sur ligne coaxiale 75 Ω (connecteur GR-900).
(Laboratoire pilote : PTB ; participants : NPL, NRC, TTL, VSL).
Deux laboratoires ont effectué les mesures (document GT-RF/86-2).
- 75-B3 Facteur de réflexion à 1 GHz sur ligne coaxiale 75 Ω .
(Laboratoire pilote : NRC ; participants : LCIE, NPL, OMH, PTB, TTL, VSL).
La comparaison doit débiter prochainement. Le laboratoire pilote pense utiliser des étalons de transfert équipés de connecteurs GR900 à moins que des connecteurs nouveaux et compatibles avec les précédents ne soient choisis avec l'accord des participants (document GT-RF/86-13).

- 75-C3 Temps de montée d'impulsions sur ligne coaxiale 50 Ω .
(Laboratoire pilote : NBS ; participants : ETL, NIM*, NPL).
Le NBS contactera les laboratoires participants afin de mettre au point un programme commun.
- 78-1 Affaiblissement (60 et 100 dB) à 30 MHz sur ligne coaxiale 50 Ω .
(Laboratoire pilote : PTB ; participants : IEN, LCIE, NPL, CSIRO, VSL, FFV, NBS, NIM, OMH, PKN, VNIIFTRI).
Cette comparaison est organisée sous l'égide du Bureau Communautaire des Références (CEE) et du BIPM. La « comparaison BCR » est terminée et a fait l'objet d'un compte-rendu final distribué aux participants correspondants. Six laboratoires de la « comparaison BIPM » ont terminé leurs mesures (document GT-RF/86-2).
- 78-2 Puissance (10 mW) à 500 MHz sur ligne coaxiale 75 Ω (connecteur GR900).
(Laboratoire pilote : NRC ; participants : LCIE, NPL, OMH, PTB, TTL, VSL).
La comparaison débutera prochainement (document GT-RF/86-13).
- 78-5 Gain d'un cornet et taux de polarisation transversale entre 8 et 12 GHz.
(Laboratoire pilote : NBS ; participants : NPL, TUD, FTZ, IEN, CNET, NRC, CSIRO, ETL).
Il a été convenu que la bande de fréquence prévue initialement (4-60 GHz) devait être réduite.
Le VSL s'est retiré de cette comparaison qui suit son cours (document GT-RF/86-11).
- 78-7 Puissance laser à ondes entretenues (10,6 μm).
(Laboratoire pilote : NBS ; participants : PTB, NPL, ETL, NRC).
Le laboratoire pilote fournira aux participants les détails techniques de la comparaison (document GT-RF/86-11).
- 78-9 Énergie laser (1,06 μm).
(Laboratoire pilote : NBS ; participants : NPL, PTB, ETL, VSL*.)
La comparaison pourrait débuter en 1987 (document GT-RF/86-11).
- 78-13 Puissance de bruit sur guide d'ondes R100.
(Laboratoire pilote : RSRE ; participants : CSIRO, ETL, LCIE, NBS, NIM, PTB).
Trois laboratoires ont effectué les mesures. La comparaison suit son cours (document GT-RF/86-13).
- 83-3 Puissance à 94 GHz.
(Laboratoire pilote : ETL ; participants : NBS, RSRE, LCIE).
Les mesures sont en cours actuellement au LCIE (document GT-RF/86-7).

* Sujet à confirmation

- 83-4 Mesure des coefficients de dispersion (« S parameters ») à l'aide de système « large bande » dans la bande de fréquence 2-18 GHz. (Laboratoire pilote : RSRE ; participants : NBS, CSIRO, PTB, VSL, NIM).
Le RSRE interrogera les participants potentiels pour choisir des étalons de transfert adéquats et un programme de mesure approprié (éventuellement un ordinateur avec logiciel sera fourni afin de normaliser les résultats). La PTB et le NIM ne peuvent effectuer des mesures que sur guide d'ondes (8,2-12,4 GHz) (document GT-RF/86-12).

TABLEAU IV

Comparaisons projetées

- 86-1 Puissance surfacique à 2,45 et 10 GHz.
Champ électrique entre 300 et 1 000 MHz.
(Laboratoire pilote : NPL ; participants : IEN, LCIE, NBS, VSL, CSIRO, NRC*, PTB*, NIM*.)
Cette comparaison remplace celles numérotées 78-10 et 83-2, elle débutera dès que des étalons de transfert stables dans le temps seront disponibles.
- 86-2 Facteur de surtension jusqu'à 30 MHz.
(Laboratoire pilote : NBS ; participants : IEN, LCIE, NIM, PTB, SESC, VSL, CSIRO*.)
Cette comparaison, organisée en substitution à la 83-1, peut débuter prochainement.
- 86-3 Facteur de réflexion (en module et phase) sur guide d'ondes (R320) à 3 fréquences : 27, 35 et 40 GHz.
(Laboratoire pilote : RSRE ; participants : LCIE, NIM, NBS, ETL*, NRC*.)
- 86-4 Puissance laser à 0,85, 1,3 et 1,55 μm .
(Laboratoire pilote : NBS ; participants : ETL, LCIE, NPL, VSL, VNIIFTRI*, IEN/CSELT*) (documents GT-RF/86-8 et GT-RF/86-10).
- 86-5 Affaiblissement de fibre optique (< 50 dB).
(Laboratoire pilote : ETL ; participants : NBS, VSL, NPL*, VNIIFTRI*, LCIE*, IEN/CSELT*) (document GT-RF/86-8).
- 86-6 Puissance à 20 GHz sur guide d'ondes R220, efficacité de montures bolométriques.
(Laboratoire pilote : LCIE ; participants : NBS, PTB, NIM*, NRC*, ETL*, RSRE*.)

* Sujet à confirmation

- 86-7 Puissance sur guide d'ondes à 45 GHz.
(Laboratoire pilote : NBS ; participants : RSRE*, ETL*.)
De préférence, les étalons de transfert seront équipés de guide d'ondes R400 et des brides correspondantes. Cette comparaison, sous réserve de confirmation des participants, pourrait débuter avant la prochaine réunion du Groupe de travail.
- 86-8 Affaiblissement (< 25 dB) sur guide d'ondes R320 à 27, 35 et 40 GHz.
(Laboratoire pilote : RSRE ; participants : PTB, LCIE, NBS, NRC*.)
La comparaison peut débuter après consultation des différents laboratoires intéressés.

TABLEAU V

Sujets éventuels de comparaisons futures

- R1 Gain d'antennes cornet dans les bandes millimétriques.
Les laboratoires intéressés sont les suivants : NBS, NPL, NRC.
- R2 Dispersion chromatique d'une fibre optique (1,2 à 1,6 μm).
La proposition du NPL intéresse le VSL.
- R3 Puissance de bruit sur ligne coaxiale dans la bande de fréquence 2-18 GHz.
Les laboratoires suivants sont intéressés : LCIE, NBS, PTB, RSRE.
- R4 Impédance dans la bande de fréquence 1-100 MHz. Cette proposition émanant du RSRE intéresse la majorité des participants.
- R5 Mesures dans les bandes millimétriques et sub-millimétriques ($f > 100$ GHz).
Le Groupe de travail ne se fixe pas de limite de fréquence de travail. Il examinera toutes propositions qui lui seront transmises et prend note que des comparaisons de mesure de puissance et de caractéristique d'équipement en transmission entre 100 et 300 GHz pourraient être organisées.
- R6 Mesure des coefficients de dispersion (« S parameters ») à l'aide de système « large bande » dans la bande de fréquence 2-18 GHz (pour éléments munis de connecteurs type N).
Cette comparaison, identique quant à son principe à la comparaison 83-4, sera organisée de manière informelle entre le RSRE et le NBS qui échangeront des étalons de transfert équipés de connecteurs type N.
- R7 Facteur de réflexion entre 75 et 105 GHz (fréquence préférentielle : 95 GHz).
Le NBS et le RSRE participeront à une comparaison informelle et informeront le BIPM de leurs progrès.

* Sujet à confirmation

Identification des laboratoires

ASMW	Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung, Berlin (Rép. Dém. Allemande).
CNET	Centre National d'Études des Télécommunications, Issy-les-Moulineaux (France).
CSELT	Centro Studi Elettronica E Telecomunicazioni, Turin (Italie).
CSIRO	(ancien NML), CSIRO, Division of Applied Physics, Lindfield (Australie).
CSMU	Československý Metrologický Ústav, Bratislava (Tchécoslovaquie).
ETL	Electrotechnical Laboratory, Ibaraki (Japon).
FFV	Maintenance Division, National Industries Corporation, Arboga (Suède).
FTZ	Fernmelde Technische Zentral Amt, Darmstadt (Rép. Féd. d'Allemagne).
IEN	Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, Turin (Italie).
IMM	Institut de Métrologie D.I. Mendéléév, Leningrad (U.R.S.S.).
IRT	Institut de Recherches des Télécommunications, Budapest (Hongrie).
LCIE	Laboratoire Central des Industries Électriques, Fontenay-aux-Roses (France).
NBS	National Bureau of Standards, Gaithersburg (États-Unis d'Amérique).
NIM	Institut National de Métrologie, Beijing (Rép. Pop. de Chine).
NPL	National Physical Laboratory, Teddington (Royaume-Uni).
NRC	Conseil National de Recherches, Ottawa (Canada).
OMH	Országos Mérésügyi Hivatal, Budapest (Hongrie).
PKN	Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Varsovie (Pologne).
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig (Rép. Féd. d'Allemagne).
RIND	Institut de Recherches de la Défense, Stockholm (Suède).
RSRE	(ancien RRE), Royal Signals and Radar Establishment, Malvern (Royaume-Uni).

SESC	(ancien EQD), Service Electrical Standards Centre, Bromley (Royaume-Uni).
SNIIM	Institut de Recherche Scientifique Sibérien en Métrologie, Moscou (U.R.S.S.).
TTL	(ancien PTF), Telelutkimuslaitos, Helsinki (Finlande).
TUD	Technical University of Denmark, Lyngby (Danemark).
VNIIFTRI	Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques, Moscou (U.R.S.S.).
VSL	Van Swinden Laboratorium, Delft (Pays-Bas).



ANNEXE E 1

Documents de travail présentés à la 17^e session du CCE

Ces documents de travail, qu'ils soient ou non publiés dans ce volume, peuvent être obtenus dans leur langue originale sur demande adressée au BIPM.

Document
CCE/

- 86-1 BIPM. — Rapport sur la 14^e comparaison des étalons nationaux de résistance électrique (novembre 1983, février 1984 et mars 1985), par G. Leclerc, 20 pages.
- 86-2 BIPM. — Résultats de la 3^e comparaison internationale circulaire des étalons de capacité en silice de 10 pF, par G. Leclerc, 6 pages.
- 86-3 IMM (U.R.S.S.). — International comparisons of USSR, UK and Finland voltage standards, by O. P. Galakhova and V. I. Krzimovsky, 5 pages.
- 86-4 IMM (U.R.S.S.). — On the maintenance of the voltage and resistance units, by Yu. V. Tarbeyev, N. V. Studentsov and V. S. Tuninsky, 4 pages.
- 86-5 CSIRO (Australie). — Le comportement des étalons NML de résistance de 1 Ω au cours des comparaisons internationales récentes, par G. W. Small, 2 pages.
- 86-6 CSIRO (Australie). — Determination of $2e/h$ at the National Measurement Laboratory, by G. J. Sloggett, M. F. Currey and D. J. Benjamine, 6 pages.
- 86-7 CSIRO (Australie). — Use and development of electronic voltage standards at the Australian National Measurement Laboratory, by R. B. Frenkel and W. Murray, 4 pages.
- 86-8 NRC (Canada). — Progress toward a quantum Hall resistance standard at NRC, 1 page.
- 86-9 NRC (Canada). — Standard volt at NRC, 1 page.
- 86-10 NRC (Canada). — The as-maintained unit of capacitance at NRC, 1 page.
- 86-11 NRC (Canada). — Resistive voltage divider development at NRC, 2 pages.

- 86-12 IMM (U.R.S.S.). — Absolute realization of the ohm, by V. S. Gourianov, I. Ya. Klebanov, O. A. Miazdrikov, V. A. Novikov and V. P. Shigorin, 4 pages.
- 86-13 CSIRO (Australie). — Revised value and estimate of uncertainties in NML's realization of the SI ohm, by G. W. Small, 4 pages.
- 86-14 CSIRO (Australie). — Quantized Hall resistances measured in terms of the NML SI ohm, by B. W. Ricketts, 3 pages.
- 86-15 LCIE (France). — Détermination absolue du farad, de l'ohm et mesure de la résistance de Hall quantifiée $R_H(2)$ au LCIE, par F. Delahaye, A. Fau, D. Dominguez et M. Bellon, 7 pages.
- 86-16 LCIE (France). — Comparaisons précises de résistances de Hall quantifiées, par F. Delahaye et D. Dominguez, 11 pages.
- 86-17 BNM (France). — Réajustement de la valeur recommandée de $2e/h$. Recommandation pour une valeur de h/e^2 , par J. Blouet, 2 pages.
- 86-18 NBS (États-Unis d'Amérique). — Update of « New Results From Previously Reported NBS Fundamental Constant Determinations », by B. N. Taylor, 2 pages.
- 86-19 NBS (États-Unis d'Amérique). — Ten volt round-robin test conducted on a solid-state DC voltage standard, by B. F. Field and T. E. Kiess, 4 pages.
- 86-20 OFMET (Suisse). — The quantum Hall effect as a standard to define the laboratory unit of resistance, by W. Schwitz, 20 pages.
- 86-21 VSL (Pays-Bas). — On the VSL calculable capacitor, by P. de Waard and K. Harmans, 2 pages.
- 86-22 VSL (Pays-Bas). — On the possible (re-)assignment of values to $2e/h$ and/or h/e^2 , by K. Harmans, 3 pages.
- 86-23 VSL (Pays-Bas). — On the development of fiber optic metrology at VSL, by J. de Vreede, H. Reyn, K. Harmans and R. Kaarls, 2 pages.
- 86-24 VSL (Pays-Bas). — A general progress report of VSL during 1983-1986, by K. Harmans and R. Kaarls, 3 pages.
- 86-25 ASMW (Rép. Dém. Allemande). — La détermination du coefficient gyromagnétique γ'_p en tant que base d'une représentation exacte de l'ampère, par J. Forkert et W. Schlesok, 11 pages.
- 86-26 NPL (Royaume-Uni). — A realisation of the SI ampere by the NPL moving coil balance, by B. P. Kibble, I. A. Robinson and J. H. Belliss, 2 pages.
- 86-27 NPL (Royaume-Uni). — The relationship between Ω_{SI} , Ω_{NPL} and h/e^2 , by A. Hartland, R. G. Jones, B. P. Kibble and D. J. Legg, 18 pages.
- 86-28 NRC (Canada). — A report on the evaluation of quantum Hall resistance samples, 4 pages.

- 86-29 NBS Boulder et Gaithersburg (États-Unis d'Amérique). — The NBS Josephson array voltage standard, by C. A. Hamilton, R. L. Kautz, F. L. Lloyd, R. L. Steiner and B. F. Field, 4 pages.
- 86-30 NBS (États-Unis d'Amérique). — Multijunction thermal converters as the NBS primary AC-DC transfer standards for ac current and voltage measurements, by F. L. Hermach, J. R. Kinard and J. R. Hastings, 5 pages.
- 86-31 NBS (États-Unis d'Amérique). — Status of the quantum Hall effect experiments at NBS, 6 pages.
- 86-32 ETL (Japon). — Determination of quantized Hall resistance value by using calculable capacitor at ETL, by K. Shida, T. Wada and T. Igarashi, 7 pages.
- 86-33 ETL (Japon). — Direct Comparison of Quantized Hall Resistance Between Si-MOSFET and GaAs/AlGaAs Heterostructure Devices on the Same Sample Holder, by K. Shida, T. Wada, H. Nishinaka and T. Igarashi (*Japan. Journ. Applied Physics*, **25**, 1986, pp. L63-L65).
- 86-34 ETL (Japon). — Study of the Quantized Hall Effect as a Resistance Standard at ETL, by T. Wada, K. Shida, H. Nishinaka and T. Igarashi (*IEEE Trans. on Instrum. and Meas.*, **IM-34**, 1985, pp. 306-309).
- 86-35 ETL (Japon). — Quantum Hall effect in silicon n-MOS inversion layers: Experimental conditions for determination of h/e^2 , by K. Yoshihiro *et al.*, 6 pages.
- 86-36 ETL (Japon). — Quantum Hall effect in silicon metal-oxide-semiconductor inversion layers: Experimental conditions for determination of h/e^2 , by K. Yoshihiro *et al.* (*Physical Review B*, **33**, 1986, pp. 6874-6896).
- 86-37 ETL (Japon). — Fabrication of AlGaAs/GaAs heterostructure quantum Hall devices, by T. Wada, K. Shida and T. Igarashi, 5 pages.
- 86-38 ETL (Japon). — Two-Dimensional Electron Gas in an n⁺-GaAs/Undoped AlGaAs/Undoped GaAs SIS Structure, by T. Wada *et al.* (*Japan. Journ. Applied Physics*, **24**, 1985, pp. L213-L216).
- 86-39 ETL (Japon). — Josephson voltage systems at the ETL, by Y. Murayama, Y. Sakamoto and T. Sakuraba, 3 pages.
- 86-40 ETL (Japon). — Nb/Al-oxide/Nb and NbN/MgO/NbN Tunnel Junctions in Large Series Arrays for Voltage Standards, by J. Niemeyer, Y. Sakamoto, E. Vollmer, J. H. Hinken, A. Shoji, H. Nakagawa, S. Takada and S. Kosaka (*Japan. Journ. Applied Physics*, **25**, 1986, pp. L343-L345).
- 86-41 ETL (Japon). — Preparation of the SI ampere measurement at ETL, by T. Yamazaki and M. Kobayashi, 4 pages.
- 86-42 ETL (Japon). — Report on the γ'_p (low) experiment at the ETL, by H. Nakamura, N. Kasai and H. Sasaki, 6 pages.

- 86-43 BIPM. — The realization of the quantum Hall standard of resistance at the BIPM, by T. J. Witt, T. Endo and D. Reymann, 18 pages.
- 86-44 BIPM. — An Automatic System for Accurate Standard Cell Comparisons, by T.J. Witt (*IEEE Trans. Instrum. Meas.*, IM-34, 1985, pp. 270-274).
- 86-45 BIPM. — A simple thermoregulated enclosure for standard cells, by D. Reymann (*Sci. Instrum., J. Phys. E*, 17, 1984, pp. 1142-1147).
- 86-46 NBS (États-Unis d'Amérique) et BIPM. — Summary of experimental data relative to the items in the revised provisional agenda, by B. N. Taylor, T. J. Witt and T. Endo, 34 pages.
- 86-47 Rapport de la 7^e session du Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences, 10 pages.
- 86-48 Note on the activities of the Electricity Section of the BIPM, 1986, by T. J. Witt, 8 pages.
- 86-49 ASMW (Rép. Dém. Allemande). — Sur la réalisation des unités électriques ohm, volt et farad à l'ASMW, par Eckard Johannsen, 5 pages.
- 86-50 ASMW (Rép. Dém. Allemande). — Progress in the field of radio-frequency voltage measurements at the Office for Standardization, Metrology and Quality Control in the GDR (ASMW), by Horst Solga, 5 pages.
- 86-51 NIM (Chine). — A determination of $2e/h$ in SI units in China, 4 pages.
- 86-52 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — Precision measurements of quantized Hall resistances and tests for sample selection, by E. Braun, P. Warnecke and G. Hein, 9 pages.
- 86-53 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — The present status of the PTB voltage standard with Josephson series arrays, by J. Niemeyer and L. Grimm, 5 pages.
- 86-54 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — International comparison of ac electric power measurements, by R. Bergeest, 6 pages.
- 86-55 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — Experience with the PTB multijunction thermal converter as an AC-DC transfer standard, by M. Klonz, 10 pages.
- 86-56 IEN (Italie). — Advances in DC and LF electrical metrology at IEN in 1983-1986, 6 pages.
- 86-57 IEN (Italie). — Recent developments on the maintained voltage unit at IEN, by D. Andreone and V. Lacquaniti, 6 pages.
- 86-58 IEN (Italie). — International comparisons of resistance standards between Italy, Brazil and Argentina, by G. Boella, S. D'Emilio and G. Rua, 5 pages.
- 86-59 VSL (Pays-Bas). — Interim results of the international comparison of AC-DC transfer standards, by K. Harmans and R. Kaarls, 4 pages.

Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences

Document
GT-RF/

- 86-1 NPL (Royaume-Uni). — Report on Intercomparison of Photon-Drag Detector Sensitivities at 10.6 μm : NPL-NBS October 1983-January 1984, by J. G. Edwards and P. A. Smith, NPL (April 1984), amended, A. G. Roddie, NPL (February 1986).
- 86-2 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — Status report on the international intercomparisons in which the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) was or is involved as pilot laboratory, by U. Stumper.
- 86-3 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — International intercomparison of attenuation in waveguide R 140 (WG 18, WR 62) at the frequency 15 GHz, by H. Bayer.
- 86-4 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — Results of an international intercomparison of microwave power in waveguide R 140 (WG 18, WR 62) at 15 GHz among some standardizing laboratories, by H. Bayer.
- 86-5 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — International comparison of voltage (1 V) in coaxial line at frequencies up to 1 GHz, by H. Bayer and D. Janik.
- 86-6 NBS (États-Unis d'Amérique). — Final Report; 6 GHz Coaxial Power International Intercomparison, by M. P. Weidman.
- 86-7 ETL (Japon). — Interim Report on an International Intercomparison of Power at 94 GHz, by I. Yokoshima.
- 86-8 ETL (Japon). — Proposal on international intercomparisons.
- 86-9 ASMW (Rép. Dém. Allemande). — Lettre du 8 juillet 1986: propositions pour deux nouvelles comparaisons.
- 86-10 NBS (États-Unis d'Amérique). — Proposal: The measurement of optical power at wavelengths and power levels of interest to the optical fiber communication community.
- 86-11 NBS (États-Unis d'Amérique). — Reports on the progress of the following intercomparisons: 75-C3, 78-5, 78-7, 78-9.
- 86-12 RSRE (Royaume-Uni). — Brief reports on the progress of the following intercomparisons: 78-11, 78-13, 83-4.
- 86-13 NRC (Canada). — Report to the Seventh Session of the Radio Frequency Working Group, by R. F. Clark and A. Jurkus.
-

ANNEXE E 2

**Résumé des déterminations de $2e/h$,
représentations du volt fondées sur l'effet Josephson
et possibilités de comparer des étalons de tension**

par Barry N. TAYLOR

National Bureau of Standards, Gaithersburg

et

Thomas J. WITT

Bureau International des Poids et Mesures

(Document CCE/86-46 mis à jour ; partie relative
à l'effet Josephson)

Cette annexe, qui comporte essentiellement des tableaux et une bibliographie, figure seulement dans sa version originale (*voir* p. E 111).

ANNEXE E 3

**Résumé des déterminations de la résistance de Hall quantifiée
et possibilités de comparer des étalons de résistance**

par Barry N. TAYLOR

National Bureau of Standards, Gaithersburg

et

Thomas J. WITT

Bureau International des Poids et Mesures

(Document CCE/86-46 mis à jour ; partie relative
à l'effet Hall quantique)

Cette annexe, qui comporte essentiellement des tableaux et une bibliographie, figure seulement dans sa version originale (*voir* p. E 122).

ANNEXE E 4

Résultats de la troisième comparaison internationale circulaire des étalons de capacité en silice de 10 pF

par G. LECLERC

Bureau International des Poids et Mesures

(Document CCE/86-2)

Cette comparaison, commencée en décembre 1978, a été terminée en mars 1985. Elle a comporté quatre circuits de mesures. Les résultats des trois premiers ont été publiés en 1983⁽¹⁾; nous les reproduisons néanmoins dans les tableaux I à III.

Les résultats du quatrième et dernier circuit au cours duquel les trois condensateurs voyageurs ont été étalonnés successivement au NBS, à l'ASMW, à la PTB, au NPL, au VSL et pour finir une nouvelle fois au NBS, sont donnés dans le tableau IV.

La température qui correspond à la résistance, spécifiée par le NBS, du thermomètre associé à chaque condensateur n'étant pas rigoureusement 25,000 °C, les résultats donnés à 25,000 °C par le NRC en septembre 1981 (tableau III), par l'ASMW en octobre 1983 (tableau IV) et par le VSL en octobre 1984 (tableau IV) ne sont pas directement comparables aux autres résultats. Pour estimer l'ordre de grandeur de la correction à leur appliquer nous avons déterminé, en décembre 1984, la résistance à 25,000 °C des thermomètres associés aux condensateurs. Les résultats ont été les suivants :

Condensateur N°	Résistance à 25,000 °C du thermomètre associé	Résistance spécifiée par le NBS
156 775 (108)	25,763 8 Ω ($s = 0,000\ 05$ Ω)	25,763 Ω
159 852 (119)	25,617 9 Ω ($s = 0,000\ 05$ Ω)	25,617 Ω
159 853 (120)	25,670 1 Ω ($s = 0,000\ 05$ Ω)	25,671 Ω

(1) BIPM Com. Cons. Électricité, 16, 1983, Annexe E2, pp. E28-E32.

Pour calculer les corrections nous avons ensuite utilisé les coefficients de variation des capacités en fonction de celle des résistances des thermomètres $\left(\frac{1}{C} \frac{\delta C}{\delta R}\right)$ fournis par le NBS.

Condensateur N°	Correction
156 775 (108) : $106,0 \times 10^{-6} \Omega^{-1} (25,763 - 25,763 8) \Omega$	$= - 0,08 \times 10^{-6}$
159 852 (119) : $108,6 \times 10^{-6} \Omega^{-1} (25,617 - 25,617 9) \Omega$	$= - 0,10 \times 10^{-6}$
159 853 (120) : $102,2 \times 10^{-6} \Omega^{-1} (25,671 - 25,670 1) \Omega$	$= + 0,09 \times 10^{-6}$
	moyenne $= - 0,03 \times 10^{-6}$

Comme on le voit la moyenne des corrections ($- 0,03 \times 10^{-6}$) à appliquer sur le résultat final est négligeable, eu égard à l'incertitude sur la valeur absolue de la représentation du farad conservée par les laboratoires concernés.

On remarque que par rapport à la représentation du farad conservée par le NBS les étalons de capacité ont varié, au cours du quatrième circuit de mesures, de quantités supérieures à celles attendues compte tenu de leurs évolutions antérieures. La capacité de chaque condensateur étant définie pour une valeur spécifiée du thermomètre associé il est possible qu'une partie de la variation observée soit imputable à une dérive de la résistance de ce thermomètre.

On constate finalement qu'il existe toujours des différences relatives de quelques 10^{-7} entre les représentations de l'unité SI de capacité conservées dans les divers laboratoires.

Mars 1986

TABLEAU I

Résultats de la troisième comparaison internationale circulaire des étalons de capacité en silice de 10 pF

(1^{er} circuit de mesures)

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

Valeur de Δ (mesures au voisinage de 25 °C) (1)

Étalon N°	NBS		NPL		PTB		NBS	
	1 ^{er} décembre 1978 (100 V ; 1592 Hz)	1 ^{er} février 1979	1 ^{er} avril 1979	1 ^{er} mai-15 juin 1979 (75 V ; 1592 Hz)	1 ^{er} novembre 1979 (100 V ; 1592 Hz)			
156 775 (108) :	- 14,08 ₆	- 14,07	- 13,99 (2)	- 13,46 (3)	- 14,02 ₂			
159 852 (119) :	- 1,21 ₉	- 1,25	- 1,22	- 0,66	- 1,27 ₇			
159 853 (120) :	- 0,24 ₈	- 0,25	- 0,17	+ 0,40	- 0,20 ₆			
	- 5,18 ₄	- 5,19	- 5,13	- 4,57	- 5,16 ₆			

(1) La température à laquelle sont donnés les résultats est celle qui correspond à la valeur spécifiée par le NBS de la résistance du thermomètre associé à l'étalon.

(2) Par suite du dérèglage d'un thermostat, la température est descendue à 10 °C pendant 48 heures les 3 et 4 février 1979.

(3) Incertitude de la comparaison aux étalons de référence : $s = 0,04 \times 10^{-6}$, incertitude de la représentation de l'unité de capacité conservée par la PTB : « erreur fortuite » : $\pm 0,4 \times 10^{-6}$ ($P = 95\%$) ; résidus des « erreurs systématiques » : $\pm 0,6 \times 10^{-6}$.

TABLEAU II
Résultats de la troisième comparaison internationale circulaire des étalons de capacité en silice de 10 pF

(2^e circuit de mesures)
 $C = 10 (1 + \Delta \times 10^{-6})$ pF

Valeur de Δ (mesures au voisinage de 25 °C) (1)

Étalon N°	Valeur de Δ (mesures au voisinage de 25 °C) (1)			
	NBS 1 ^{er} avril 1980 (100 V ; 1592 Hz)	NIM 7 et 8 août 1980 (100 V ; 1592 Hz)	VSL 2 octobre 1980 (100 V ; 1592 Hz)	NPRL décembre 1980 (50 V ; 1000 Hz)
156 775 (108) †	- 14,00 ₀	- 13,74 (2)	- 14,65 (2)	- 25,7 (4)
159 852 (119) †	- 1,28 ₄	- 1,08	- 1,95	- 13,0
159 853 (120) †	- 0,16 ₃	+ 0,06	- 1,10	- 11,9
	- 5,14 ₉	- 4,92	- 5,90	- 16,87
				- 13,95 ₀
				- 1,26 ₄
				- 0,04 ₇
				- 5,08 ₇

1^{er} avril 1981
(100 V ; 1592 Hz) NBS

(1) La température à laquelle sont donnés les résultats est celle qui correspond à la valeur spécifiée par le NBS de la résistance du thermomètre associé à l'étalon.

(2) NIM : reproductibilité des résultats : $0,04 \times 10^{-6}$; incertitude due pour l'essentiel au condensateur à variation de capacité calculable : $s = 0,35 \times 10^{-6}$.

(3) VSL : incertitude de la comparaison aux étalons de référence qui conservent le farad au VSL : $s = 0,02 \times 10^{-6}$.

(4) NPRL : incertitude de la comparaison à l'étalon de référence qui conserve le farad au NPRL : $0,2 \times 10^{-6}$ (niveau de confiance : 99,7 %).

Résultats de la troisième comparaison internationale circulaire des étalons de capacité en silice de 10 pF

(3^e circuit de mesures)

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

Valeur de Δ (mesures au voisinage de 25 °C) (1)

Étalon N°	NBS		NRC		LCIE		IEN	
	1 ^{er} avril 1981 (100 V ; 1592 Hz)		1 ^{er} septembre 1981 (100 V ; 1592 Hz)		4 janvier 1982 (5 V ; 1592 Hz)		14 août 1982 (100 V ; 1592 Hz)	1 ^{er} mars 1983 (100 V ; 1592 Hz)
156 775 (108) :	- 13,95 ₀		- 14,44 ₁ (2)		- 13,96 ₀ (3)		- 13,91 ₁ (4)	- 13,89 ₀
159 852 (119) :	- 1,26 ₄		- 1,81 ₀		- 1,31 ₂		- 1,29 ₅	- 1,22 ₂
159 853 (120) :	- 0,04 ₇		- 0,71 ₂		- 0,21 ₈		- 0,02 ₀	+ 0,09 ₈
	- 5,08 ₇		- 5,65 ₄		- 5,16 ₃		- 5,06 ₂	- 5,00 ₅

(1) À l'exception des résultats du NRC donnés à 25,000 °C, la température à laquelle sont donnés ceux des autres laboratoires est celle qui correspond à la valeur spécifiée par le NBS de la résistance du thermomètre associé à l'étalon.

(2) NRC : incertitude de la comparaison aux étalons de référence qui conservent le farad au NRC : $s = 0,013 \times 10^{-6}$.

(3) LCIE : erreur probable : $0,3 \times 10^{-6}$.

(4) IEN : incertitude de la comparaison aux étalons de référence qui conservent le farad à l'IEN : $s = 0,002 \times 10^{-6}$ pour l'étalon N° 108 ; $s = 0,004 \times 10^{-6}$ pour l'étalon N° 119 et $s = 0,003 \times 10^{-6}$ pour l'étalon N° 120.

Valeurs de Δ (mesures au voisinage de 20 °C)

Étalon N°	IEN	
	11 août 1982	
156 775 (108) :	- 66,23 ₀ (1)	
159 852 (119) :	- 54,79	
159 853 (120) :	- 50,82 ₀	
	- 57,28 ₀	

(1) Incertitude de la comparaison aux étalons de référence qui conservent le farad à l'IEN : $s = 0,002 \times 10^{-6}$ pour l'étalon N° 108 ; $s = 0,017 \times 10^{-6}$ pour l'étalon N° 119 ; (l'importance de cette incertitude résulte de l'instabilité du condensateur N° 119 à 20 °C, instabilité déjà signalée en 1975) et $s = 0,003 \times 10^{-6}$ pour l'étalon N° 120.

TABLEAU IV

Résultats de la troisième comparaison internationale circulaire des étalons de capacité en silice de 10 pF

(4^e circuit de mesures)

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

Valeur de Δ (mesures au voisinage de 25 °C) (1)

Étalon N°	NBS		ASMW		PTB		NPL		VSL		NBS	
	Date	Conditions	Date	Conditions	Date	Conditions	Date	Conditions	Date	Conditions	Date	Conditions
156 775 (108) :	15 juin 1983	(100 V ; 1592 Hz)	26 octobre 1983	(70 V ; 1592 Hz)	1 ^{er} février 1984	(50 V ; 1592 Hz)	1 ^{er} mai 1984	(100 V)	21 octobre 1984	(120 V ; 1596 Hz)	15 mars 1985	(100 V ; 1592 Hz)
159 852 (119) :												
159 853 (120) :												
Moyenne												

(1) À l'exception des résultats de l'ASMW et du VSL donnés à 25 000 °C, la température à laquelle sont donnés ceux des autres laboratoires est celle qui correspond à la valeur spécifiée par le NBS de la résistance du thermomètre associé à l'étalon.

(2) ASMW : Incertitude de la comparaison aux étalons de référence : $0,073 \times 10^{-6}$ ($P = 99\%$) ; incertitude sur les résultats exprimés en unité SI de capacité : $0,5 \times 10^{-6}$ ($P = 99\%$).

(3) PTB : Incertitude de la comparaison aux étalons de référence $s = 0,02 \times 10^{-6}$; incertitude sur les résultats finaux : $s = 0,25 \times 10^{-6}$ due à l'incertitude de la représentation de l'unité de capacité conservée par la PTB.

(4) NPL : Incertitude de la comparaison aux étalons de référence : $\pm 0,014 \times 10^{-6}$ pour l'étalon N° 156775 ; $\pm 0,013 \times 10^{-6}$ pour l'étalon N° 159852 et $\pm 0,017 \times 10^{-6}$ pour l'étalon N° 159853.

(5) VSL : Incertitude de type A : $s = 0,02 \times 10^{-6}$; incertitude de type B : $s = 0,5 \times 10^{-6}$; incertitude composée : $2 s = 1 \times 10^{-6}$.

ANNEXE E 5

Rapport sur la 14^e comparaison des étalons nationaux de résistance électrique*

(novembre 1983, février 1984 et mars 1985)

par G. LECLERC

Bureau International des Poids et Mesures

(Document CCE/86-1)

C'est au cours de sa 16^e session, en mars 1983, que le Comité Consultatif d'Électricité a prévu l'organisation de cette comparaison. Les treize laboratoires, membres du CCE, ayant décidé d'y participer, il n'a pas paru raisonnable de réunir simultanément au BIPM les étalons représentatifs de ces treize laboratoires pour n'effectuer qu'une seule comparaison qui aurait été de très longue durée. Nous avons donc proposé aux laboratoires de les répartir en deux groupes et d'effectuer successivement deux comparaisons d'une durée d'environ six semaines chacune, les six étalons de référence du BIPM participant aux deux comparaisons.

Après consultation des laboratoires, les deux groupes ont été constitués comme suit :

Groupe A : NPRL (Pretoria), ASMW (Berlin), PTB (Braunschweig), NRC (Ottawa), LCIE (Fontenay-aux-Roses), IEN (Turin) et IMM (Leningrad).

* Cette nouvelle version (de mars 1986) regroupe les résultats contenus dans le rapport BIPM-85/9 (de septembre 1985) et dans son complément (de novembre 1985) et tient compte des remarques exprimées par certains laboratoires.

De plus, les informations communiquées par la suite par le CSIRO au sujet de la relation entre Ω_{0-10} et Ω_{CSIRO} font l'objet d'un nouveau complément à ce rapport.

Ces sept laboratoires ont fait parvenir au BIPM 19 étalons de $1\ \Omega$ qui ont été comparés entre eux et aux étalons du BIPM suivant un schéma qui a nécessité l'exécution de 62 séries « aller » et de 62 séries « retour », effectuées symétriquement dans le temps par rapport au 26 novembre 1983. La comparaison, commencée le 3 novembre 1983, a été terminée le 20 décembre.

Groupe B : CSIRO (Lindfield), NIM (Beijing), NBS (Gaithersburg), ETL (Ibaraki), VSL (Delft) et NPL (Teddington).

Ces six laboratoires ont fait parvenir au BIPM 17 étalons de $1\ \Omega$ qui ont été comparés entre eux et aux étalons du BIPM suivant un schéma qui a nécessité l'exécution de 66 séries « aller » et de 66 séries « retour », effectuées symétriquement dans le temps par rapport au 12 février 1984. La comparaison, commencée le 20 janvier 1984, a été terminée le 5 mars.

Tous les étalons voyageurs étaient des étalons de premier ordre, à quatre bornes et étanches. Pendant la durée de leur séjour au BIPM ils ont été conservés à $20\ ^\circ\text{C}$ dans des bains d'huile thermorégulés.

Les comparaisons ont été effectuées au moyen d'un pont double de Thomson à bras de $1\ 000\ \Omega$, en utilisant la méthode de substitution (les deux étalons comparés au cours d'une série de mesures étant opposés à tour de rôle à une résistance tare ajustable). Au milieu de chaque série, les bras « mesure » et « tare » du pont étaient inversés. Pendant les observations, les étalons étaient parcourus par un courant de $0,1\ \text{A}$ et leur température était déterminée à l'aide d'un thermomètre à résistance de platine.

La résistance à $0\ ^\circ\text{C}$ des deux thermomètres utilisés et celle de l'étalon tare ont été déterminées avant le début de la comparaison des étalons du groupe A, dans l'intervalle entre cette comparaison et celle des étalons du groupe B et dès la fin de celle-ci. Les ponts thermométriques ont été étalonnés en octobre et fin décembre 1983. Les mesures « aller » et les mesures « retour » de chaque comparaison ont été faites en employant des boîtes shunts différentes pour réaliser l'équilibre principal du pont.

Deux observateurs ont effectué chacun deux séries de mesures par jour, les séries « retour » de l'un correspondant aux séries « aller » de l'autre.

Les six étalons du BIPM dont la résistance moyenne sert à matérialiser Ω_{09-11} (représentation, conservée par le BIPM, de l'unité SI de résistance) ont été comparés deux à deux entre eux avant la première comparaison (du 17 au 21 octobre 1983), dans l'intervalle entre les deux comparaisons (du 30 décembre 1983 au 6 janvier 1984) et après la seconde comparaison (du 15 au 21 mars 1984).

Réduction des observations

Les résultats des comparaisons ont été traités par la méthode des moindres carrés. De la somme des valeurs des six étalons de référence du BIPM on a déduit la valeur de chacun des étalons voyageurs en fonction de Ω_{69-BI} , à 20,000 °C, pour une dissipation de 0,01 W dans l'étalon pendant la durée des observations et à la pression de 101 325 Pa pour les étalons dont on connaissait le coefficient de pression. Les résultats sont donnés dans le tableau A1 pour les étalons du groupe A (date centrale des mesures : 26 novembre 1983) et dans le tableau B1 pour ceux du groupe B (date centrale des mesures : 12 février 1984).

Les calculs qui ont permis ensuite de rattacher la représentation de l'ohm conservée par chaque laboratoire à celle conservée par le BIPM (Ω_{69-BI}) sont reproduits dans les tableaux A2 et A3 pour les laboratoires du groupe A et B2 et B3 pour ceux du groupe B.

Les deux étalons voyageurs du CSIRO, engagés dans le groupe B, ayant souffert du transport aller et retour entre Sydney et Paris via Londres et conduit à des résultats peu fiables, le CSIRO a décidé de ne pas retenir ces résultats et de recommencer la comparaison de Ω_{CSIRO} à Ω_{69-BI} . Nous n'avons donc pas fait figurer les calculs concernant ces deux étalons dans les tableaux B2 et B3.

Nouvelle comparaison de Ω_{CSIRO} à Ω_{69-BI}

Les quatre étalons du CSIRO utilisés pour effectuer cette nouvelle comparaison sont parvenus au BIPM le 2 mars 1985 (par un vol direct entre Sydney et Paris) et en sont repartis (par un même vol direct) le 7 avril 1985.

En appliquant la même méthode qu'en 1983 et 1984, en utilisant la même installation, dans les mêmes conditions, deux observateurs ont comparé deux à deux entre eux les 4 étalons du CSIRO et chacun de ceux-ci aux 6 étalons de référence du BIPM. Les séries « aller » et les séries « retour » ont été faites symétriquement dans le temps par rapport au 24 mars 1985. Les 6 étalons du BIPM ont eux-mêmes été comparés deux à deux entre eux en février 1985, avant la comparaison des étalons du CSIRO et en avril 1985, après cette comparaison. Les résultats des mesures, traités par la méthode des moindres carrés, ont fourni les valeurs à 20,000 °C, sous la pression de 101 325 Pa, des résistances des étalons voyageurs du CSIRO exprimées en fonction de Ω_{69-BI} , au 24 mars 1985. Ces valeurs sont données dans le tableau C1.

Les calculs qui ont permis ensuite de rattacher Ω_{CSIRO} à Ω_{69-BI} sont reproduits dans les tableaux C2 et C3.

Comparaison supplémentaire de Ω_{NPL} à $\Omega_{69-\text{BI}}$

Cette comparaison a été entreprise à l'occasion du transit par le BIPM, en provenance d'Australie, de deux étalons de 1 Ω du CSIRO destinés au NPL.

Les deux étalons ont été comparés entre eux et aux six étalons de référence du BIPM en janvier 1984, immédiatement avant le début de la comparaison internationale du Groupe B et en mars 1984, immédiatement après l'achèvement de cette comparaison. En fonction de $\Omega_{69-\text{BI}}$ on a obtenu les valeurs suivantes des étalons à 20,000 °C, à la mi-février 1984 (époque moyenne des deux déterminations) :

$$\begin{aligned} \text{étalon S-60652} &: 1,000\,054\,15 \Omega_{69-\text{BI}} \\ \text{S-60656} &: 1,000\,011\,80 \Omega_{69-\text{BI}}. \end{aligned}$$

Transportés et étalonnés au NPL en même temps que les étalons voyageurs de ce laboratoire, leurs valeurs à 20,000 °C exprimées en fonction de Ω_{NPL} au 29 mars 1984 (date centrale des mesures) ont été les suivantes :

$$\begin{aligned} \text{étalon S-60652} &: 1,000\,053\,77 \Omega_{\text{NPL}} \\ \text{S-60656} &: 1,000\,011\,43 \Omega_{\text{NPL}}. \end{aligned}$$

On en déduit qu'en février-mars 1984 on avait la relation ci-après entre Ω_{NPL} et $\Omega_{69-\text{BI}}$:

$$\begin{aligned} \text{avec S-60652} \quad \Omega_{\text{NPL}} &= \Omega_{69-\text{BI}} + 0,38 \mu\Omega \\ \text{S-60656} \quad \Omega_{\text{NPL}} &= \Omega_{69-\text{BI}} + 0,37 \mu\Omega \\ \text{et en moyenne} \quad \Omega_{\text{NPL}} &= \Omega_{69-\text{BI}} + 0,37 \mu\Omega. \end{aligned}$$

Bien que cette comparaison ne soit pas métrologiquement complète, les étalons S-60652 et S-60656 n'ayant pas été réétalonnés au BIPM après leur mesure au NPL, ce dernier a désiré qu'il en soit tenu compte pour calculer le résultat final de la 14^e comparaison internationale en ce qui le concernait. Ainsi qu'il l'a proposé, ce résultat final a donc été calculé en prenant la moyenne pondérée des résultats individuels des trois étalons voyageurs et des étalons S-60652 et S-60656, les trois premiers affectés d'un poids double de celui affecté aux deux autres, ce qui a conduit à la relation suivante : $\Omega_{\text{NPL}} = \Omega_{69-\text{BI}} + 0,32 \mu\Omega$.

Résultats finaux de la 14^e comparaison des étalons nationaux de résistance

Ces résultats sont rassemblés dans les tableaux A4, B4 et C4.

*Liste des étalons de résistance
qui ont participé à la 14^e comparaison*

Laboratoire	Étalon	Arrivée au BIPM	Départ du BIPM	Mode de transport
<i>Premier groupe :</i>				
NPRL (Afrique du Sud)	1 132 427	29 septembre 1983	29 février 1984	par avion accompagnés
	1 146 606			
ASMW (Rép. Dém. Allemande)	501	16 octobre 1983	9 mars 1984	par avion accompagnés
	508			
	D-3			
PTB (Rép. Féd. d'Allemagne)	1 692 273	14 octobre 1983	18 janvier 1984	par la route accompagnés
	1 730 950			
	1 730 951			
NRC (Canada)	1 336 435	2 novembre 1983	11 janvier 1984	par avion en fret
	1 336 436			
	32 249			
LCIE (France)	1 732 525	28 octobre 1983	17 janvier 1984	par la route accompagnés
	1 732 530			
	1 732 532			
IEN (Italie)	1 681 955	26 novembre 1983	17 janvier 1984	par la route accompagnés
	1 681 957			
	1 723 160			
IMM (URSS)	710	15 octobre 1983	6 avril 1984	par avion accompagnés
	922			
<i>Deuxième groupe :</i>				
CSIRO (Australie)	S-60655	14 décembre 1983	14 mars 1984	par avion en fret
	S-60657			
NIM (Rép. Pop. de Chine)	127BZ13	11 janvier 1984	12 mars 1984	par avion accompagnés
	201BZ13			
	303BZ13			
NBS (États-Unis d'Amérique)	77	1 ^{er} décembre 1983	2 mars 1984	par avion accompagnés
	1 018			
	1 020			
ETL (Japon)	8C13	10 janvier 1984	15 mars 1984	par avion en fret
	70C111			
	72C202			
VSL (Pays-Bas)	1 753 639	5 décembre 1983	18 avril 1984	par la route accompagnés
	1 753 641			
	1 756 653			
NPL (Royaume-Uni)	713	9 janvier 1984	16 mars 1984	par avion accompagnés
	221 921			
	221 928			
<i>Étalons supplémentaires :</i>				
CSIRO (Australie)	S-60650	2 mars 1985	7 avril 1985	par avion en fret
	S-60651			
	S-60655			
	S-60657			

TABLEAU A1

*Résistance des étalons voyageurs, à 20,000 °C, exprimée en fonction de Ω_{69-BI}
(représentation, conservée par le BIPM, de l'unité SI de résistance)
au 26 novembre 1983 (date centrale de la comparaison)*

Laboratoire	Étalon	Résistance	Incertitude (s)
NPRL	1 132 427	0,999 992 57 Ω_{69-BI}	0,011 $\mu\Omega$
	1 146 606	0,999 991 90	0,011
ASMW	501	1,000 015 02 Ω_{69-BI}	0,013 $\mu\Omega$
	508	0,999 992 39	0,013
	D-3	1,000 041 68	0,012
PTB	1 692 273	0,999 980 81 Ω_{69-BI}	0,012 $\mu\Omega$
	1 730 950	0,999 976 83	0,012
	1 730 951	0,999 975 24	0,012
NRC	32 249	1,000 029 72 Ω_{69-BI}	0,012 $\mu\Omega$
	1 336 435	0,999 995 00	0,012
	1 336 436	0,999 992 97	0,013
LCIE	1 732 525	0,999 978 22 Ω_{69-BI}	0,013 $\mu\Omega$
	1 732 530	0,999 978 06	0,012
	1 732 532	0,999 978 41	0,012
IEN	1 681 955	0,999 976 85 Ω_{69-BI}	0,012 $\mu\Omega$
	1 681 957	0,999 974 77	0,012
	1 723 160	0,999 979 34	0,012
IMM	710	0,999 996 79 Ω_{69-BI}	0,011 $\mu\Omega$
	922	1,000 014 40	0,011

TABLEAU A2

*Résistance * des étalons voyageurs, à 20,000 °C,
exprimée en fonction de la représentation de l'ohm conservée
par leur laboratoire d'origine, à la date du 26 novembre 1983*

La résistance au 26 novembre 1983, date centrale de la comparaison, a été calculée par interpolation linéaire entre les résistances attribuées aux étalons par les laboratoires nationaux avant et après les mesures au BIPM.

NPRL

Étalon	1 ^{er} septembre 1983	23 mars 1984	26 novembre 1983
1 132 427	0,999 992 6	0,999 992 65	0,999 992 62 Ω_{NPRL}
1 146 606	0,999 991 8	0,999 991 75	0,999 991 78
	<u>0,999 992 20</u>	<u>0,999 992 20</u>	<u>0,999 992 20 Ω_{NPRL}</u>

Valeurs mesurées sous une pression de 88 180 Pa.

ASMW

	11 octobre 1983	19 mars 1984	
501	1,000 014 9	1,000 014 9	1,000 014 90 Ω_{ASMW}
508	0,999 992 3	0,999 992 2	0,999 992 27
D-3	1,000 041 8	1,000 041 6	1,000 041 74
	<u>1,000 016 33</u>	<u>1,000 016 23</u>	<u>1,000 016 30 Ω_{ASMW}</u>

PTB

	1 ^{er} octobre 1983	1 ^{er} février 1984	
1 692 273	0,999 979 729	0,999 979 768	0,999 979 747 Ω_{PTB}
1 730 950	0,999 975 751	0,999 975 798	0,999 975 772
1 730 951	0,999 974 117	0,999 974 222	0,999 974 165
	<u>0,999 976 532</u>	<u>0,999 976 596</u>	<u>0,999 976 561 Ω_{PTB}</u>

Mesures effectuées avec un courant de 0,042 A.

NRC

	22 octobre 1983	24 janvier 1984	
32 249	1,000 031 27	1,000 031 64	1,000 031 41 Ω_{NRC}
1 336 435	0,999 996 89	0,999 996 83	0,999 996 87
1 336 436	0,999 994 84	0,999 994 79	0,999 994 82
	<u>1,000 007 67</u>	<u>1,000 007 75</u>	<u>1,000 007 70 Ω_{NRC}</u>

Mesures effectuées avec un courant de 0,05 A.

* Sauf indication contraire, cette résistance a été mesurée sous une pression voisine de 101 325 Pa et avec un courant, de 0,1 A.

LCIE

Étalon	21 octobre 1983	3 février 1984	26 novembre 1983
1 732 525	0,999 977 30	0,999 977 30	0,999 977 30 Ω_{LCIE}
1 732 530	0,999 977 12	0,999 977 13	0,999 977 12
1 732 532	<u>0,999 977 47</u>	<u>0,999 977 47</u>	<u>0,999 977 47</u>
	0,999 977 30	0,999 977 30	0,999 977 30 Ω_{LCIE}

Mesures effectuées avec un courant de 0,04 A.

IEN

	10 octobre 1983	1 ^{er} février 1984	
1 681 955	0,999 975 42	0,999 975 36	0,999 975 40 Ω_{IEN}
1 681 957	0,999 973 40	0,999 973 33	0,999 973 37
1 723 160	<u>0,999 977 84</u>	<u>0,999 977 85</u>	<u>0,999 977 84</u>
	0,999 975 55	0,999 975 51	0,999 975 53 Ω_{IEN}

IMM

	6 octobre 1983	19 avril 1984	
710	0,999 995 38	0,999 995 20	0,999 995 33 Ω_{IMM}
922	<u>1,000 012 99</u>	<u>1,000 012 85</u>	<u>1,000 012 95</u>
	1,000 004 18 ₅	1,000 004 02 ₅	1,000 004 14 Ω_{IMM}

TABLEAU A3

Valeur de la représentation de l'ohm conservée par chaque laboratoire
en fonction de Ω_{69-BI} , représentation conservée par le BIPM,
à la date du 26 novembre 1983

Étalon		NRPL	
1 132 427	$0,999\ 992\ 77\ \Omega_{\text{NRPL}} = 0,999\ 992\ 57\ \Omega_{69-BI}$	d'où	$\Omega_{\text{NRPL}} = \Omega_{69-BI} - 0,20\ \mu\Omega$
1 146 606	$0,999\ 991\ 93 = 0,999\ 991\ 90$		$= -0,03$
	$0,999\ 992\ 35\ \Omega_{\text{NRPL}} = 0,999\ 992\ 23\ \Omega_{69-BI}$	d'où	$\Omega_{\text{NRPL}} = \Omega_{69-BI} - 0,12\ \mu\Omega$

Les valeurs du NRPL données dans le tableau A2 ont été corrigées pour les ramener à la pression de 101 325 Pa.

		ASMW	
501	$1,000\ 014\ 90\ \Omega_{\text{ASMW}} = 1,000\ 015\ 02\ \Omega_{69-BI}$	d'où	$\Omega_{\text{ASMW}} = \Omega_{69-BI} + 0,12\ \mu\Omega$
508	$0,999\ 992\ 27 = 0,999\ 992\ 39$		$= +0,12$
D-3	$1,000\ 041\ 74 = 1,000\ 041\ 68$		$= -0,06$
	$1,000\ 016\ 30\ \Omega_{\text{ASMW}} = 1,000\ 016\ 36\ \Omega_{69-BI}$	d'où	$\Omega_{\text{ASMW}} = \Omega_{69-BI} + 0,06\ \mu\Omega$

		PTB	
1 692 273	$0,999\ 979\ 747\ \Omega_{\text{PTB}} = 0,999\ 980\ 811\ \Omega_{69-BI}$	d'où	$\Omega_{\text{PTB}} = \Omega_{69-BI} + 1,06_4\ \mu\Omega$
1 730 950	$0,999\ 975\ 772 = 0,999\ 976\ 831$		$= +1,05_9$
1 730 951	$0,999\ 974\ 165 = 0,999\ 975\ 236$		$= +1,07_1$
	$0,999\ 976\ 561\ \Omega_{\text{PTB}} = 0,999\ 977\ 626\ \Omega_{69-BI}$	d'où	$\Omega_{\text{PTB}} = \Omega_{69-BI} + 1,06_5\ \mu\Omega$

		NRC	
1 336 435	$0,999\ 996\ 87\ \Omega_{\text{NRC}} = 0,999\ 995\ 00\ \Omega_{69-BI}$	d'où	$\Omega_{\text{NRC}} = \Omega_{69-BI} - 1,87\ \mu\Omega$
1 336 436	$0,999\ 994\ 82 = 0,999\ 992\ 97$		$= -1,85$
	$0,999\ 995\ 84_5\ \Omega_{\text{NRC}} = 0,999\ 993\ 98_5\ \Omega_{69-BI}$	d'où	$\Omega_{\text{NRC}} = \Omega_{69-BI} - 1,86\ \mu\Omega$

Sa valeur ayant anormalement varié au cours des transports, l'étalon n° 32249 a été éliminé à la demande du NRC.

		LCIE	
1 732 525	$0,999\ 977\ 30\ \Omega_{\text{LCIE}} = 0,999\ 978\ 22\ \Omega_{69-BI}$	d'où	$\Omega_{\text{LCIE}} = \Omega_{69-BI} + 0,92\ \mu\Omega$
1 732 530	$0,999\ 977\ 12 = 0,999\ 978\ 06$		$= +0,94$
1 732 532	$0,999\ 977\ 47 = 0,999\ 978\ 41$		$= +0,94$
	$0,999\ 977\ 30\ \Omega_{\text{LCIE}} = 0,999\ 978\ 23\ \Omega_{69-BI}$	d'où	$\Omega_{\text{LCIE}} = \Omega_{69-BI} + 0,93\ \mu\Omega$

		IEN	
1 681 955	$0,999\ 975\ 40\ \Omega_{\text{IEN}} = 0,999\ 976\ 85\ \Omega_{69-BI}$	d'où	$\Omega_{\text{IEN}} = \Omega_{69-BI} + 1,45\ \mu\Omega$
1 681 957	$0,999\ 973\ 37 = 0,999\ 974\ 77$		$= +1,40$
1 723 160	$0,999\ 977\ 84 = 0,999\ 979\ 34$		$= +1,50$
	$0,999\ 975\ 53\ \Omega_{\text{IEN}} = 0,999\ 976\ 98\ \Omega_{69-BI}$	d'où	$\Omega_{\text{IEN}} = \Omega_{69-BI} + 1,45\ \mu\Omega$

		IMM	
710	$0,999\ 995\ 33\ \Omega_{\text{IMM}} = 0,999\ 996\ 79\ \Omega_{69-BI}$	d'où	$\Omega_{\text{IMM}} = \Omega_{69-BI} + 1,46\ \mu\Omega$
922	$1,000\ 012\ 95 = 1,000\ 014\ 40$		$= +1,45$
	$1,000\ 004\ 14\ \Omega_{\text{IMM}} = 1,000\ 005\ 59\ \Omega_{69-BI}$	d'où	$\Omega_{\text{IMM}} = \Omega_{69-BI} + 1,45\ \mu\Omega$

TABLEAU B1

Résistance des étalons voyageurs, à 20,000 °C, exprimée en fonction de Ω_{69-81}
 (représentation, conservée par le BIPM, de l'unité SI de résistance)
 au 12 février 1984 (date centrale de la comparaison)

Laboratoire	Étalon	Résistance	Incertitude (s)
CSIRO	S-60 655	0,999 997 97 Ω_{69-81}	0,008 $\mu\Omega$
	S-60 657	1,000 000 75	0,008
NIM	127 BZ 13	0,999 989 22 Ω_{69-81}	0,010 $\mu\Omega$
	201 BZ 13	0,999 987 38	0,010
	303 BZ 13	1,000 002 79	0,012
NBS	77	1,000 006 11 Ω_{69-81}	0,008 $\mu\Omega$
	1 018	0,999 974 32	0,009
	1 020	0,999 974 16	0,008
ETL	8C13	0,999 994 20 Ω_{69-81}	0,009 $\mu\Omega$
	70C111	1,000 002 33	0,009
	72C202	0,999 999 30	0,010
VSL	1 753 639	0,999 977 28 Ω_{69-81}	0,010 $\mu\Omega$
	1 753 641	0,999 977 31	0,010
	1 756 653	0,999 978 72	0,011
NPL	713	1,000 049 34 Ω_{69-81}	0,010 $\mu\Omega$
	221 921	1,000 007 66	0,009
	221 928	0,999 999 95	0,009

TABLEAU B2

Résistance * des étalons voyageurs, à 20,000 °C,
 exprimée en fonction de la représentation de l'ohm conservée
 par leur laboratoire d'origine, à la date du 12 février 1984

La résistance au 12 février 1984, date centrale de la comparaison, a été calculée par interpolation linéaire entre les résistances attribuées aux étalons par les laboratoires nationaux avant et après les mesures au BIPM.

Étalon	NIM		
	7 décembre 1983	22 mars 1984	12 février 1984
127BZ13	0,999 988 77	0,999 988 76	0,999 988 76 Ω_{NIM}
201BZ13	0,999 986 82	0,999 986 80	0,999 986 81
303BZ13	<u>1,000 002 34</u>	<u>1,000 002 30</u>	<u>1,000 002 31</u>
	0,999 992 64	0,999 992 62	0,999 992 63 Ω_{NIM}
		NBS	
77			1,000 005 90 ₅ Ω_{NBS}
1 018			0,999 974 15 ₄
1 020			<u>0,999 973 96₇</u>
			0,999 984 67 ₅ Ω_{NBS}

La résistance de chaque étalon au 12 février 1984 a été calculée au NBS en utilisant une formule de régression linéaire déduite de 94 mesures : 61 mesures faites entre le 2 septembre et le 28 novembre 1983 (avant l'envoi des étalons au BIPM) et 33 mesures faites entre le 3 mars et le 2 mai 1984 (après leur retour à Gaithersburg).

	ETL		
	15 novembre 1983	10 mai 1984	
8C13	0,999 992 78	0,999 992 56	0,999 992 67 Ω_{ETL}
70C111	1,000 000 88	1,000 000 66	1,000 000 77
72C202	<u>0,999 997 79</u>	<u>0,999 997 62</u>	<u>0,999 997 70</u>
	0,999 997 15	0,999 996 95	0,999 997 05 Ω_{ETL}
	VSL		
	17 novembre 1983	22 juin 1984	
1 753 639	0,999 976 78	0,999 976 71	0,999 976 75 Ω_{VSL}
1 753 641	0,999 976 69	0,999 976 77	0,999 976 72
1 756 653	<u>0,999 978 18</u>	<u>0,999 978 14</u>	<u>0,999 978 16</u>
	0,999 977 22	0,999 977 21	0,999 977 21 Ω_{VSL}
	NPL		
	5 janvier 1984	29 mars 1984	
713	1,000 048 95	1,000 048 97	1,000 048 96 Ω_{NPL}
221 921	1,000 007 34	1,000 007 41	1,000 007 37
221 928	<u>0,999 999 70</u>	<u>0,999 999 74</u>	<u>0,999 999 72</u>
	1,000 018 66	1,000 018 71	1,000 018 68 Ω_{NPL}

* Cette résistance a été mesurée sous une pression voisine de 101 325 Pa et avec un courant de 0,1 A.

TABLEAU B3

Valeur de la représentation de l'ohm conservée par chaque laboratoire
en fonction de Ω_{69-BI} , représentation conservée par le BIPM,
à la date du 12 février 1984

NIM

Étalon

127BZ13	0,999 988 76 Ω_{NIM}	=	0,999 989 22 Ω_{69-BI}	d'où	$\Omega_{NIM} = \Omega_{69-BI} + 0,46 \mu\Omega$
201BZ13	0,999 986 81	=	0,999 987 38	=	+ 0,57
303BZ13	1,000 002 31	=	1,000 002 79	=	+ 0,48
	0,999 992 63 Ω_{NIM}	=	0,999 993 13 Ω_{69-BI}	d'où	$\Omega_{NIM} = \Omega_{69-BI} + 0,50 \mu\Omega$

NBS

77	1,000 005 91 Ω_{NBS}	=	1,000 006 11 Ω_{69-BI}	d'où	$\Omega_{NBS} = \Omega_{69-BI} + 0,20 \mu\Omega$
1018	0,999 974 15	=	0,999 974 32	=	+ 0,17
1020	0,999 973 97	=	0,999 974 16	=	+ 0,19
	0,999 984 68 Ω_{NBS}	=	0,999 984 86 Ω_{69-BI}	d'où	$\Omega_{NBS} = \Omega_{69-BI} + 0,19 \mu\Omega$

ETL

8C13	0,999 992 67 Ω_{ETL}	=	0,999 994 20 Ω_{69-BI}	d'où	$\Omega_{ETL} = \Omega_{69-BI} + 1,53 \mu\Omega$
70C111	1,000 000 77	=	1,000 002 33	=	+ 1,56
72C202	0,999 997 70	=	0,999 999 30	=	+ 1,60
	0,999 997 05 Ω_{ETL}	=	0,999 998 61 Ω_{69-BI}	d'où	$\Omega_{ETL} = \Omega_{69-BI} + 1,56 \mu\Omega$

VSL

1 753 639	0,999 976 75 Ω_{VSL}	=	0,999 977 28 Ω_{69-BI}	d'où	$\Omega_{VSL} = \Omega_{69-BI} + 0,53 \mu\Omega$
1 753 641	0,999 976 72	=	0,999 977 31	=	+ 0,59
1 756 653	0,999 978 16	=	0,999 978 72	=	+ 0,56
	0,999 977 21 Ω_{VSL}	=	0,999 977 77 Ω_{69-BI}	d'où	$\Omega_{VSL} = \Omega_{69-BI} + 0,56 \mu\Omega$

NPL

713	1,000 048 96 Ω_{NPL}	=	1,000 049 34 Ω_{69-BI}	d'où	$\Omega_{NPL} = \Omega_{69-BI} + 0,38 \mu\Omega$
221 921	1,000 007 37	=	1,000 007 66	=	+ 0,29
221 928	0,999 999 72	=	0,999 999 95	=	+ 0,23
	1,000 018 68 Ω_{NPL}	=	1,000 018 98 Ω_{69-BI}	d'où	$\Omega_{NPL} = \Omega_{69-BI} + 0,30 \mu\Omega$

Comparaison auxiliaire

S-60652	1,000 053 77 Ω_{NPL}	=	1,000 054 15 Ω_{69-BI}	d'où	$\Omega_{NPL} = \Omega_{69-BI} + 0,38 \mu\Omega$
S-60656	1,000 011 43	=	1,000 011 80	=	+ 0,37
	1,000 032 60 Ω_{NPL}	=	1,000 032 97 Ω_{69-BI}	d'où	$\Omega_{NPL} = \Omega_{69-BI} + 0,37 \mu\Omega$

Moyenne pondérée (voir p. E 45) : $\Omega_{NPL} = \Omega_{69-BI} + 0,32 \mu\Omega$

TABLEAU C1

Résistance des étalons voyageurs du CSIRO, à 20,000 °C,
 exprimée en fonction de Ω_{69-BI}
 (représentation, conservée par le BIPM, de l'unité SI de résistance)
 au 24 mars 1985 (date centrale de la comparaison)

Étalon	Résistance	Incertitude (s)
S-60650	1,000 033 18 ₃ Ω_{69-BI}	0,006 $\mu\Omega$
S-60651	1,000 025 72 ₇	0,006
S-60655	0,999 998 01 ₀	0,006
S-60657	1,000 000 55 ₈	0,006

TABLEAU C2

Résistance des étalons voyageurs du CSIRO, à 20,000 °C,
 exprimée en fonction de Ω_{CSIRO}
 (représentation, conservée par le CSIRO, de l'unité SI de résistance)
 au 24 mars 1985

Cette résistance, communiquée par le CSIRO, est la valeur interpolée au 24 mars 1985 à partir de la résistance déterminée *avant* l'envoi des étalons au BIPM (colonne n° 1) et de la résistance déterminée *après* retour du BIPM (colonne n° 2).

Étalon	Colonne n° 1	Colonne n° 2	Moyenne
S-60650	1,000 031 69	1,000 031 69	1,000 031 69 Ω_{CSIRO}
S-60651	1,000 024 27	1,000 024 25	1,000 024 26
S-60655	0,999 996 51	0,999 996 48	0,999 996 49 ₅
S-60657	0,999 999 08	0,999 999 09	0,999 999 08 ₅
	1,000 012 89	1,000 012 88	1,000 012 88 Ω_{CSIRO}

TABLEAU C3

Valeur de la représentation de l'ohm conservée par le CSIRO
 en fonction de Ω_{69-BI} , représentation conservée par le BIPM,
 à la date du 24 mars 1985

S-60650	1,000 031 69 Ω_{CSIRO}	= 1,000 033 18 ₃ Ω_{69-BI}	d'où $\Omega_{CSIRO} = \Omega_{69-BI} + 1,49_2 \mu\Omega$
S-60651	1,000 024 26	= 1,000 025 72 ₇	= + 1,46 ₆
S-60655	0,999 996 49 ₅	= 0,999 998 01 ₀	= + 1,51 ₅
S-60657	0,999 999 08 ₅	= 1,000 000 55 ₈	= + 1,47 ₃
	1,000 012 88 Ω_{CSIRO}	= 1,000 014 37 Ω_{69-BI}	d'où $\Omega_{CSIRO} = \Omega_{69-BI} + 1,49 \mu\Omega$

Résultats de la 14^e comparaison des étalons nationaux de résistance

TABLEAU A4

Au 26 novembre 1983

Afrique du Sud (NPRL)	: Ω_{NPRL}	= $\Omega_{69\text{-BI}}$	- 0,12 $\mu\Omega$
République Dém. Allemande (ASMW)	: Ω_{ASMW}	=	+ 0,06
République Féd. d'Allemagne (PTB)	: Ω_{PTB}	=	+ 1,06
Canada (NRC)	: Ω_{NRC}	=	- 1,86
France (LCIE)	: Ω_{LCIE}	=	+ 0,93
Italie (IEN)	: Ω_{IEN}	=	+ 1,45
URSS (IMM)	: Ω_{IMM}	=	+ 1,45

TABLEAU B4

Au 12 février 1984

République Pop. de Chine (NIM)	: Ω_{NIM}	= $\Omega_{69\text{-BI}}$	+ 0,50 $\mu\Omega$
États-Unis d'Amérique (NBS)	: Ω_{NBS}	=	+ 0,19
Japon (ETL)	: Ω_{ETL}	=	+ 1,56
Pays-Bas (VSL)	: Ω_{VSL}	=	+ 0,56
Royaume-Uni (NPL)	: Ω_{NPL}	=	+ 0,32

TABLEAU C4

Au 24 mars 1985

Australie (CSIRO)	: Ω_{CSIRO}	= $\Omega_{69\text{-BI}}$	+ 1,49 $\mu\Omega$
-------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------

avec

$$\Omega_{69\text{-BI}} \text{ (au 12 février 1984)} - \Omega_{69\text{-BI}} \text{ (au 26 novembre 1983)} = - 0,012 \mu\Omega (*)$$

et

$$\Omega_{69\text{-BI}} \text{ (au 24 mars 1985)} - \Omega_{69\text{-BI}} \text{ (au 26 novembre 1983)} = - 0,075 \mu\Omega.$$

(*) Ces différences sont calculées en admettant que $\Omega_{69\text{-BI}}$ diminue de 0,056 6 $\mu\Omega$ par an.

Incertitudes

1. — Incertitude sur la valeur des étalons voyageurs exprimée en fonction de Ω_{69-BI} (résultats des mesures du BIPM)

- Incertitudes de type A (voir tableaux A1, B1 et C1) :
 - écart-type maximal sur la résistance d'un étalon 0,013 $\mu\Omega$
 - Incertitudes de type B
 - due à la puissance dissipée dans l'étalon pendant les observations 0,01 $\mu\Omega$
 - due à la méthode de mesure (non rigoureusement potentiométrique) et aux incertitudes sur la valeur des shunts, de la tare, etc. 0,015 $\mu\Omega$
- somme quadratique $s = 0,022 \mu\Omega$

2. — Incertitude sur le résultat final des comparaisons

L'analyse de la dispersion des résultats obtenus par les divers étalons voyageurs d'un même laboratoire est un moyen d'estimer l'incertitude du rattachement de la représentation de l'ohm conservée par ce laboratoire à celle conservée par le BIPM.

Le calcul effectué pour chaque laboratoire conduit à des valeurs très dispersées de la variance (valeurs comprises entre 0 et $145 \times 10^{-4} \mu\Omega^2$) dont la moyenne est $29 \times 10^{-4} \mu\Omega^2$, soit un écart-type de $0,054 \mu\Omega$.

Mais cet écart-type ne tient pas compte des erreurs systématiques qui ont pu affecter les mesures faites dans les laboratoires nationaux et au BIPM. Si l'on admet que les incertitudes systématiques sont du même ordre de grandeur pour les laboratoires nationaux que pour le BIPM, il faut majorer la variance calculée ci-dessus de $2 \times 3,25 \times 10^{-4} \mu\Omega^2$, ce qui conduit à $35,5 \times 10^{-4} \mu\Omega^2$, c'est-à-dire à un écart-type de $6,0 \times 10^{-2} \mu\Omega$ comme incertitude du rattachement obtenu avec un étalon.

Pour les laboratoires qui ont participé aux comparaisons avec deux étalons, l'écart-type sur le résultat final serait alors de $10^{-2}(6,5 + 29/2)^{1/2} \mu\Omega$, soit environ $0,046 \mu\Omega$; pour ceux qui ont participé avec trois étalons, de $10^{-2}(6,5 + 29/3)^{1/2} \mu\Omega$, soit environ $0,040 \mu\Omega$ et pour ceux qui ont participé avec quatre étalons, de $10^{-2}(6,5 + 29/4)^{1/2} \mu\Omega$, soit environ $0,037 \mu\Omega$.

Mars 1986

Complément au Rapport de la 14^e comparaison
des représentations nationales de l'ohm

**Estimation de la valeur de la représentation de l'ohm conservée
au BIPM, Ω_{69-BI} , en ohms, et son évolution dans le temps**

Depuis 1964 la valeur de Ω_{CSIRO} , représentation de l'ohm conservée par le CSIRO, est déterminée en ohms au moyen d'un condensateur calculable. De plus, jusqu'à la fin de 1985, sept comparaisons de Ω_{69-BI} à Ω_{CSIRO} ont été menées à bien, si l'on tient compte de la comparaison incomplète de février 1984 au cours de laquelle quatre résistances de 1 Ω , fabriquées par le CSIRO, ont été envoyées au BIPM pour y être comparées à Ω_{69-BI} , après quoi deux d'entre elles ont été conservées au BIPM, et les deux dernières envoyées au NPL pour y être conservées à titre définitif.

Le document CCE/86-13, présenté lors de la 17^e session du CCE, mentionne la découverte par le CSIRO d'une erreur systématique dans les déterminations de Ω_{CSIRO} depuis 1974 et donne les valeurs corrigées de $\Omega_{69-BI} - \Omega_{\text{CSIRO}}$. De plus, dans un article récent ⁽¹⁾, le CSIRO donne des estimations des incertitudes associées aux comparaisons effectuées à l'aide d'étalons voyageurs et aux déterminations de l'ohm. Ces résultats sont donnés au tableau E5-1.

Le CSIRO estime qu'une fonction linéaire du temps ajustée par la méthode des moindres carrés avec pondération prend en compte de la meilleure façon les améliorations progressives des résultats des comparaisons et des déterminations de l'ohm. Chaque poids provient de la somme des composantes de la variance dans la détermination de l'ohm, composantes que l'on peut considérer comme généralement différentes pour chaque résultat (conséquence des conditions expérimentales différentes), et de la variance dans la comparaison au BIPM. La valeur de chaque poids est l'inverse de cette somme. Le résultat est le suivant :

$$\Omega_{69-BI} - \Omega_{\text{CSIRO}} = a + bt$$

où

t est la durée, évaluée en années, depuis 1986-01-01,

$a = -1,627 \mu\Omega$ (écart-type : $s = 0,010 \mu\Omega$),

$b = -0,0618 \mu\Omega/\text{an}$ (écart-type : $0,0015 \mu\Omega/\text{an}$).

⁽¹⁾ SMALL, G.W. Twenty years of SI ohm determinations at NML (*IEEE Trans. Instrum. Meas.*, IM-36, June 1987, pp. 190-195).

TABLEAU E5-1

*Valeur corrigée et incertitude de Ω_{69-B1} exprimées en ohms
au moyen des déterminations de l'ohm effectuées au CSIRO,
et des comparaisons entre le CSIRO et le BIPM*

Date moyenne	$\Omega_{69-B1} - \Omega_{CSIRO}$ ($\mu\Omega$)	Écart-type en $\mu\Omega$				total toutes origines comprises
		de la comparaison avec le BIPM	de la détermination de l'ohm (composante variable seule)	somme quadratique des deux colonnes précédentes (*)		
1964-01-26	-0,31	0,093	0,065	0,114	0,138	
1967-02-18	-0,45	0,093	0,065	0,114	0,138	
1970-02-01	-0,57	0,079	0,032	0,085	0,108	
1973-02-25	-0,80	0,068	0,071	0,098	0,119	
1977-05-19	-1,11	0,021	0,020	0,029	0,070	
1984-02-10	-1,50	0,028	0,010	0,030	0,068	
1985-03-24	-1,58	0,020	0,010	0,023	0,065	

(*) Le poids utilisé pour l'ajustement est l'inverse du carré de cet écart-type.

On notera que les valeurs de a et b ne sont pas particulièrement sensibles aux valeurs prises pour les poids. Par exemple, avec les mêmes points et des poids égaux, a changerait de $0,01 \mu\Omega$ alors que b resterait quasiment inchangé. Les incertitudes associées à a et b sont de type A. Il convient de les combiner avec les composantes de type B pour obtenir l'incertitude totale. La colonne de droite du tableau, qui donne l'incertitude totale, permet de déduire que de la composante de type B l'incertitude associée à a est actuellement inférieure à $0,06 \mu\Omega$ environ.

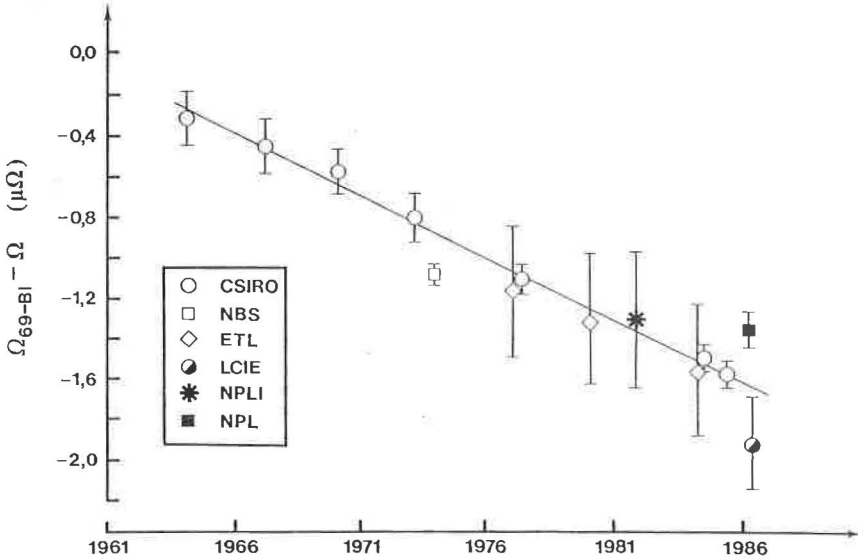


Fig. E5-1. — Dérive de Ω_{69-B1} , d'après les déterminations de l'ohm effectuées au CSIRO.

La figure E5-1 représente la variation de Ω_{69-B1} , en ohms, en fonction du temps. La droite résulte de l'ajustement décrit ci-dessus. À titre de comparaison, on a aussi indiqué les valeurs de Ω_{69-B1} que l'on peut déduire de déterminations de l'ohm faites dans d'autres laboratoires.

Juin 1987

ANNEXE E 6

Comparaison internationale de mesures de puissance électrique en courant alternatif

par R. BERGEEST

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
(Traduction du document CCE/86-54)

Résumé. — Ce rapport présente les résultats de la comparaison d'étalons nationaux de puissance électrique en courant alternatif qui a été décidée par le Comité Consultatif d'Électricité lors de sa quinzième session en 1978. On a fait circuler deux étalons de transfert, un wattmètre thermique et un comparateur électronique à modulation d'impulsions en amplitude et en durée. Les laboratoires participants devaient mesurer les erreurs relatives de ces instruments à une tension de 120 V, à un courant de 5 A, à des facteurs de puissance de 1, 0,5 et 0, et à une fréquence de 53 Hz.

Onze laboratoires participaient à la comparaison : le BEV (Autriche), l'EAM (Suisse), l'IEN (Italie), le LCE (Belgique), le LCIE (France), le NBS (États-Unis d'Amérique), le NPL (Royaume-Uni), le NRC (Canada), la PTB (Rép. Féd. d'Allemagne), le SBM-BMD (Belgique) et le VSL (Pays-Bas). La Physikalisch-Technische Bundesanstalt, laboratoire pilote, a fourni les instruments de transfert. Dans le ressort de la Communauté européenne, cette comparaison a reçu le soutien du Bureau Communautaire des Références (BCR).

Introduction

La mesure de la puissance électrique en courant alternatif est dérivée des étalons de base de tension et de résistance en courant continu, et sa réalisation fait appel à un passage du courant alternatif au courant continu. Il n'existe pas d'élément étalon de puissance en courant alternatif. Les différents systèmes d'étalonnage des laboratoires de métrologie servent à établir les références nationales de puissance en courant alternatif. Ces systèmes sont fixes et très difficiles à transporter, aussi doit-on utiliser des instruments de transfert suffisamment stables et exacts pour les comparer.

Instruments de transfert et mesures effectuées

On a utilisé comme instrument de transfert pour les mesures à des facteurs de puissance de 1 et 0,5, inductif ou capacitif, un wattmètre thermique (1) dont le principe est fondé sur un convertisseur thermique qui multiplie indirectement le signal de tension par le signal de courant et qui effectue le transfert du courant alternatif au courant continu. Il fallait appliquer à l'instrument de transfert une puissance réelle (active) en courant alternatif P_r , connue avec précision et rattachée aux grandeurs de base en courant continu, tension et résistance, au moyen du système d'étalonnage des puissances en courant alternatif. Les participants à la comparaison devaient faire un total de quinze lectures, réparties sur trois jours différents, de la puissance indiquée P_i . L'écart relatif

$$\delta_p = \frac{P_i - P_r}{P_a},$$

où P_a est la puissance apparente (le produit de la tension efficace et du courant efficace), devait être calculé et donné comme résultat.

Le wattmètre thermique permet aussi de mesurer, à des fins de contrôle, les tensions en courant continu. Dans ce cas, seules les sections d'entrée du transformateur sont mises hors circuit. Durant la comparaison, des lectures de la tension indiquée V_i correspondant à une tension continue connue V_a ont été effectuées, donnant l'écart relatif

$$\delta_v = \frac{V_i - V_a}{V_a}.$$

Dans le cas d'une valeur nulle du facteur de puissance (inductif et capacitif), on a utilisé pour les mesures un comparateur électronique de puissance à modulation d'impulsions en amplitude et en durée (2). Dans ce cas, le déphasage entre la tension et le courant appliqués à l'instrument était réglé à 90° exactement à l'aide du système d'étalonnage du laboratoire de métrologie. L'écart relatif caractérisant ces mesures est

$$\delta_p = \frac{P_i}{P_a},$$

rapport de la puissance indiquée à la puissance apparente.

Circulation des instruments de transfert et stabilité

Les deux étalons de transfert ont été transportés en voiture entre les laboratoires participants, à l'exception du transport aller-retour vers le Canada et les États-Unis d'Amérique. Un conteneur spécial antichocs a été utilisé. Les premières mesures de la comparaison ont été effectuées à la PTB en octobre 1980, et les mesures finales en août 1984, également à la PTB. Les instruments ont parcouru six circuits élémentaires comprenant trois laboratoires, et leur stabilité a été contrôlée au cours de cinq mesures intermédiaires à la PTB. Ces mesures à la PTB ont révélé une dérive linéaire pour le comparateur électronique à modulation d'impulsions d'environ $3,6 \times 10^{-6}$ par an pendant toute la durée de la comparaison.

Le comportement du wattmètre thermique n'a pas été aussi stable que prévu. Au cours des deux premières années une dérive plus ou moins linéaire d'environ 31×10^{-6} par an a été mise en évidence pour les mesures de puissance à un facteur de puissance 1 ; ensuite, l'instrument s'est montré stable à quelques 10^{-6} près pendant un an, mais au cours des mesures finales à la PTB une variation de 30×10^{-6} s'est produite en deux mois. Heureusement, les mêmes variations, propres à l'instrument, ont été mesurées non seulement pour les mesures de puissance en courant alternatif mais aussi pour les mesures de tension en courant continu, ce qui suggère l'application de la méthode de compensation des dérives décrite dans le chapitre suivant.

Résultats des mesures

Pour chacun des deux instruments de transfert on a appliqué une méthode différente pour compenser ses dérives et fluctuations propres. Pour le comparateur électronique à modulation d'impulsions utilisé pour les mesures à facteur de puissance nul, une droite de régression a été calculée à partir des mesures de la PTB, et c'est l'écart des résultats de chaque laboratoire par rapport à cette droite qui a été pris comme résultat. L'ensemble des résultats des participants a ensuite été décalé de façon à obtenir une valeur moyenne nulle. L'écart-type résiduel associé à ces résultats figure au tableau E6-1.

Une bonne méthode pour compenser la dérive et les fluctuations propres des wattmètres thermiques est de comparer les résultats d'un étalonnage de puissance en courant alternatif aux résultats des mesures de tension en courant continu. Les deux types de mesures sont affectés de la même façon par ces fluctuations, c'est pourquoi les deux résultats ont été demandés aux participants.

Cette méthode de comparaison des résultats en courant continu et en courant alternatif présente un autre avantage : chaque système d'étalonnage de puissance en courant alternatif est fondé sur une tension continue de référence, et l'étalonnage du wattmètre thermique pour les tensions continues est rapporté à la même tension continue de référence. En utilisant le wattmètre thermique comme instrument de transfert du courant alternatif au courant continu, il est possible de comparer le transfert courant continu/courant alternatif effectué à l'aide des systèmes d'étalonnage des différents laboratoires.

Le calcul du transfert courant alternatif/courant continu permet d'éliminer au premier ordre les changements de la dérive à court terme du wattmètre thermique dans les différents laboratoires, car les fluctuations propres à l'instrument influencent pareillement les mesures de puissance en courant alternatif et les mesures de tension continue.

Pour chaque participant, on a calculé pour le wattmètre l'erreur de transfert courant alternatif/courant continu, δ_T , d'après l'équation

$$\delta_T = \delta_p - 2 \delta_v \cos \Phi$$

dans laquelle δ_p , erreur relative sur la mesure de puissance en courant alternatif, et δ_v erreur relative sur la mesure en tension continue, sont toutes les deux déterminées par chaque laboratoire. Dans le cas du facteur de puissance égal à 1, la tension continue a une valeur de 6 V environ. Pour un facteur de puissance de 0,5, l'angle de phase Φ est égal à 60° et la tension continue correspondante est égale à environ 5 V. Toutes les valeurs de δ_p sont rapportées à la puissance apparente.

Le tableau E6-1 donne l'écart-type expérimental s des valeurs observées de δ_T pour chacune des cinq conditions indiquées de facteur de puissance et de réactance. Dans le cas où $\cos \Phi = 1$, la valeur de s correspond aux résultats de onze laboratoires et dans les autres cas elle correspond aux résultats de dix laboratoires.

TABLEAU E6-1

Écart-type des résultats, après compensation de la dérive, δ_T

Facteur de puissance	Écart-type s de δ_T $\times 10^6$
1	18,9
0,5 inductif	15,3
0,5 capacitif	17,1
0 inductif	28,7
0 capacitif	31,1

Conclusion

La comparaison internationale de mesures de puissance électrique en courant alternatif décrite ci-dessus est la première qui comprenne un aussi grand nombre de participants. Peu de comparaisons ont été faites précédemment dans ce domaine, et celles-ci étaient limitées à trois laboratoires (^{3,4}). Outre les mesures pour les facteurs de puissance 1 et 0,5 effectuées lors des précédentes comparaisons, on a décidé de comparer les systèmes d'étalonnage pour un déphasage de 90°, afin d'obtenir des informations précises sur les écarts de phase éventuels.

Pour le transfert de la puissance en courant alternatif à la puissance en courant continu l'écart-type entre les onze participants n'excède pas 3×10^{-5} environ, aux différents facteurs de puissance. C'est un résultat satisfaisant qui justifie l'effort consacré à cette comparaison internationale. Des résultats plus détaillés seront publiés (^{5,6}).

Références

- [1] SCHUSTER, G. Thermal instrument for measurement of voltage, current, power, and energy at power frequencies. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, IM-29, 1980, pp. 153-157.
 - [2] BERGEEST, R., FRIEDL, R., and SEYFRIED, P. High precision electronic measuring equipment for electrical power and energy, *IEE Conf. Pub.*, 113, 1974, pp. 144-146.
 - [3] McAULIFF, R. C., LENTNER, K.J., MOORE, W.J.M. and SCHUSTER, G. An international comparison of power measurements at 120 V, 5 A and 60 Hz. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, IM-27, 1978, pp. 445-449.
 - [4] TSCHAPPU, F. *Landis & Gyr-Mitteilungen*, 28, 1981, p. 15.
 - [5] BERGEEST, R. Intercomparison of AC electric power measurements in the European Communities, *BCR Information : Applied metrology*, Report EUR 10813 EN, Commission of the European Communities, 1986, 110 pages.
 - [6] Joint report of all participants (à paraître).
-

ANNEXE E 7

Mesure de puissance en coaxial à 6 GHz (Comparaison N° 72-6)

par Manly P. WEIDMAN

National Bureau of Standards (Boulder, États-Unis d'Amérique)
(Traduction du document GT-RF/86-6)

Après bientôt dix ans, la comparaison est finalement terminée. Le principe en avait été établi sous les auspices du CIPM, à Sèvres en octobre 1972. Les mesures effectives ne commencèrent qu'en octobre 1974.

Neuf laboratoires ont participé à la comparaison : NBS (États-Unis d'Amérique, laboratoire pilote), RIND (Suède), NRC (Canada), IEN (Italie), NPL (Royaume-Uni), PTB (République fédérale d'Allemagne), OMH (Hongrie), LCIE (France) et CSIRO (NML, Australie). Les personnes responsables de cette comparaison dans chaque laboratoire étaient R. Bostrom et G. Nilsson (RIND), A. Jurkus (NRC), G. Rietto (IEN), A. Fantom (NPL), H. Bayer (PTB), H. Szokol (OMH), L. Énard (LCIE) et D. Hollway (CSIRO).

L'ensemble voyageur était composé de trois montures commerciales de thermistances, équipées chacune avec l'un des types de connecteur suivants : type N, GR-900 et APC-7. Les thermistances étaient accompagnées de cinq adaptateurs pour permettre le raccordement avec les trois types de connecteurs. Il était demandé aux participants de mesurer le plus grand nombre de configurations possible. Le paramètre principal à mesurer était l'efficacité réelle des trois montures de thermistance, respectivement η_N , η_9 , η_7 . Les mesures directes et indirectes de l'efficacité des adaptateurs furent regroupées de façon à obtenir des comparaisons entre tous les laboratoires, bien que ceux-ci n'aient pas tous pu mesurer les trois types de connecteurs. Les résultats et les incertitudes furent communiqués au laboratoire pilote. Un diagramme a été établi en combinant toutes les mesures effectuées pour chacune des trois montures.

Les étalons voyageurs et les adaptateurs furent tout d'abord mesurés au NBS puis envoyés au CSIRO. Du CSIRO, ils furent envoyés au NPL, puis au LCIE, puis au NBS pour y être mesurés à nouveau. Du NBS, ils furent envoyés à l'IEN où ils ne furent pas mesurés, mais transmis au RIND, puis au NRC, puis de nouveau au NBS, où deux des montures furent encore mesurées. Les étalons furent ensuite envoyés à la PTB, puis à l'IEN et renvoyés au NBS où les deux mêmes montures ont été mesurées à nouveau. L'ensemble fut enfin envoyé à l'OMH et finalement retourné au NBS. Aucun changement notable n'a été relevé au cours des années et des différents voyages. Pour l'avenir, il n'est pas recommandé d'entreprendre une comparaison de cette envergure (comportant neuf laboratoires et trois types de connecteurs), si l'on veut s'en tenir à une durée plus raisonnable.

On a admis que l'efficacité combinée d'une configuration monture-adaptateur donnée est le produit des efficacités respectives de la monture et de l'adaptateur dans des conditions d'impédance spécifiques. Deux laboratoires mesurèrent toutes les configurations possibles des montures et des adaptateurs. L'efficacité des adaptateurs fut déduite de ces mesures. Les incertitudes systématiques s'éliminent dans ce type de comparaison (les erreurs systématiques sur l'efficacité d'une monture ou d'une combinaison monture-adaptateur sont généralement dans le même sens). Après examen des résultats relatifs aux adaptateurs, on a pensé qu'il était raisonnable d'ajouter une incertitude supplémentaire de $\pm 0,3\%$ aux mesures indirectes de l'efficacité réelle d'une thermistance.

La figure E7-1 illustre les différentes configurations des adaptateurs et des montures de thermistance proposées au début de la comparaison. Certains laboratoires ont été capables de mesurer un nombre de configurations supérieur à celui de la figure E7-1, d'autres en ont mesuré moins.

Sur la figure E7-2 et dans le tableau E7-1, les laboratoires sont numérotés dans l'ordre suivant : 1 - NBS, 2 - CSIRO (NML), 3 - NPL, 4 - LCIE, 5 - RIND, 6 - NRC, 7 - PTB, 8 - IEN, 9 - OMH.

Le diagramme de la figure E7-2 illustre les résultats des mesures de chaque laboratoire (directs ou calculés) ainsi que l'incertitude systématique ou globale associée. Comme décrit précédemment, l'incertitude représentée sur cette figure pour les valeurs calculées est l'incertitude du laboratoire pour la configuration monture-adaptateur augmentée d'une incertitude de $\pm 0,3\%$ pour l'adaptateur. Par exemple, le laboratoire « A » a mesuré la monture « type N » avec un adaptateur « type N femelle, APC-7 » pour obtenir une efficacité totale de $\eta_{eN} \times \eta_{aN7}$, où η_{eN} est l'efficacité réelle de la monture type N et η_{aN7} l'efficacité de l'adaptateur dans des conditions d'impédance données. En utilisant le résultat général pour η_{aN7} , on peut calculer η_{eN} pour la mesure du laboratoire « A ». L'incertitude de η_{eN} est alors l'incertitude sur $\eta_{eN} \times \eta_{aN7}$ augmentée de l'incertitude de $\pm 0,3\%$ due à l'adaptateur.

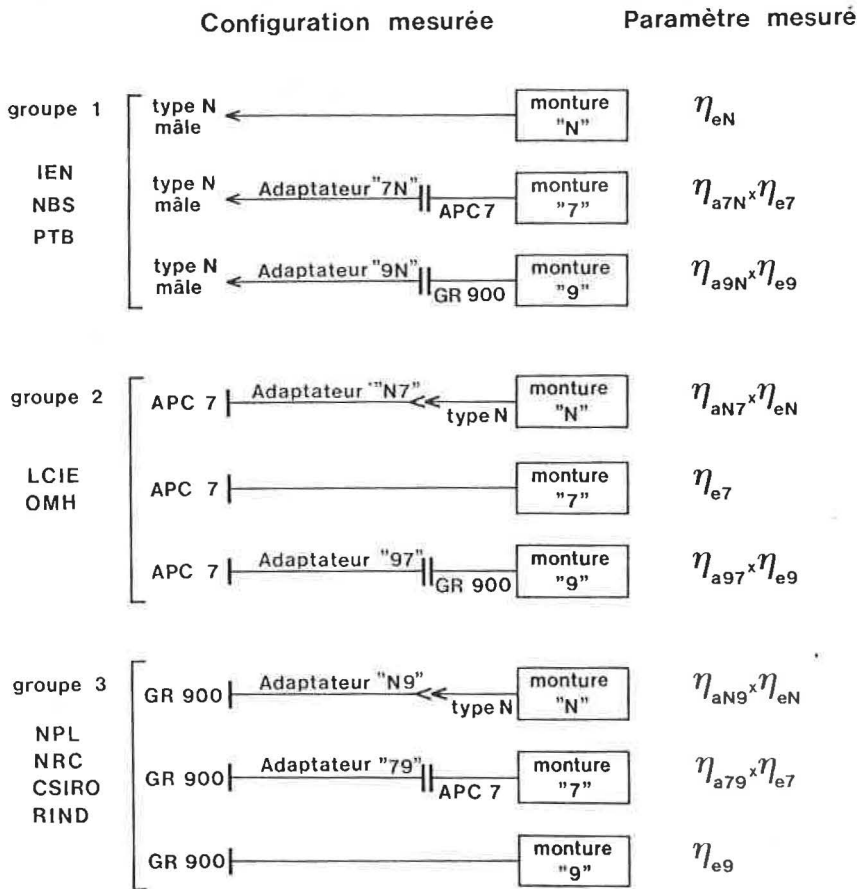


Fig. E7-1. — Configurations étudiées et paramètre correspondant. Le paramètre mesuré est soit l'efficacité de la montage, soit l'efficacité de l'ensemble montage-adaptateur. L'adaptateur « 79 » est l'adaptateur « 97 » inversé.

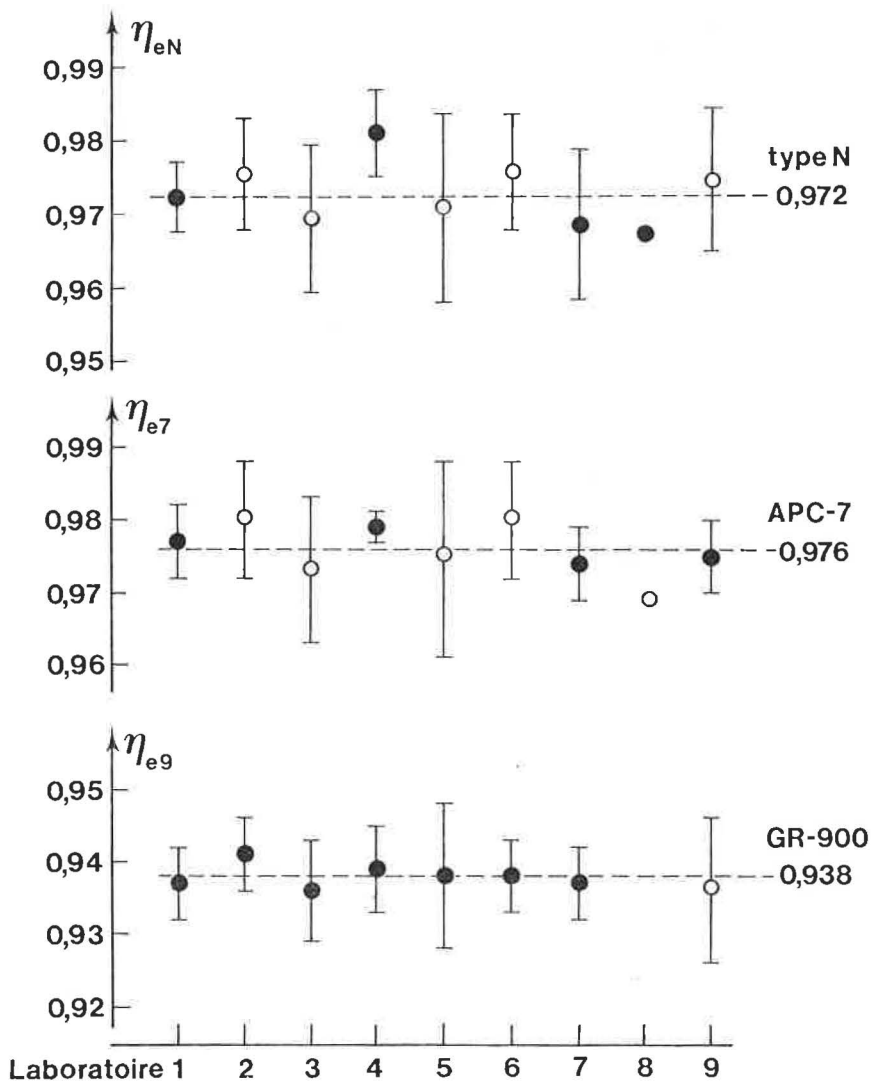


Fig. E7-2. — Efficacité des trois montures à thermistance, type N, APC-7 et GR-900, déterminée par les neuf laboratoires. Disques noirs : mesures directes. Disques blancs : déterminations déduites des mesures avec adaptateur ; dans ce cas, l'incertitude est majorée de $\pm 0,3\%$. En pointillé, moyenne des déterminations.

TABLEAU E7-1

Résultats bruts et moyennes

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Moyennes
η_{EN}	$0,972 \pm 0,5 \%$	$0,975 \text{ calc.}$	$0,969 \text{ calc.}$	$0,981 \pm 0,6 \%$	$0,970 \text{ calc.}$	$0,975 \text{ calc.}$	$0,968 \pm 1 \%$	$0,967$	$0,974 \text{ calc.}$	$0,972$
η_{E7}	$0,977 \pm 0,5 \%$	$0,980 \text{ calc.}$	$0,973 \text{ calc.}$	$0,979 \pm 0,2 \%$	$0,975 \text{ calc.}$	$0,980 \text{ calc.}$	$0,974 \pm 0,5 \%$	$0,969 \text{ calc.}$	$0,975 \pm 0,5 \%$	$0,976$
η_{E9}	$0,937 \pm 0,5 \%$	$0,941 \pm 0,5 \%$	$0,936 \pm 0,7 \%$	$0,939 \pm 0,6 \%$	$0,938 \pm 1 \%$	$0,938 \pm 0,5 \%$	$0,937 \pm 0,5 \%$		$0,936 \text{ calc.}$	$0,938$
$\eta_{E79} \times \eta_{E7}$	$0,969 \pm 0,5 \%$	$0,974 \pm 0,5 \%$	$0,967 \pm 0,7 \%$		$0,969 \pm 1 \%$	$0,974 \pm 0,5 \%$	$0,969 \pm 0,5 \%$			$0,970$
$\eta_{BN9} \times \eta_{BN}$	$0,964 \pm 0,5 \%$	$0,968 \pm 0,5 \%$	$0,962 \pm 0,7 \%$		$0,963 \pm 1 \%$	$0,969 \pm 0,5 \%$	$0,964 \pm 1 \%$			$0,965$
$\eta_{E7N} \times \eta_{E7}$	$0,960 \pm 0,5 \%$						$0,945 \pm 1 \%$	$0,947$		$0,951$
$\eta_{E7N} \times \eta_{E9}$	$0,931 \pm 0,5 \%$						$0,930 \pm 1 \%$			$0,931$
$\eta_{E97} \times \eta_{E9}$	$0,930 \pm 0,5 \%$			$0,934 \pm 0,4 \%$			$0,930 \pm 1 \%$		$0,931 \pm 0,7 \%$	$0,931$
$\eta_{E7N7} \times \eta_{E7N}$	$0,965 \pm 0,5 \%$			$0,970 \pm 0,4 \%$			$0,965 \pm 1 \%$		$0,967 \pm 0,7 \%$	$0,967$

Certains participants ont mesuré de nombreuses configurations de montures et d'adaptateurs, mais sur la figure E7-2 on a retenu seulement la mesure dont l'incertitude est la plus faible pour chacune des trois montures. Le laboratoire 8 n'a fourni aucune incertitude ; il n'a pas non plus mesuré la monture GR-900. Certaines des mesures indiquées sur la figure E7-2 ont été effectuées avec un micro-calorimètre et d'autres avec un système de transfert, c'est-à-dire comme des mesures de type secondaire.

Le tableau E7-1 rassemble les résultats bruts (et certains résultats calculés), avec leurs incertitudes, et les valeurs moyennes correspondantes.

Le laboratoire pilote remercie tous les participants de cette comparaison internationale, et en particulier les premiers participants, pour leur patience.

ANNEXE E 8

Comparaison internationale d'affaiblissement à 15 GHz sur guide d'ondes R 140 (WG 18, WR 62) (Comparaison N° 75-A3)

par H. BAYER

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Rép. Féd. d'Allemagne)

Le rapport final de cette comparaison a été publié dans *BIPM Monographie 85/1* et dans *Metrologia*, **23**, 1986/87, pp. 121-127. Les résultats sont résumés dans le Document CCE/86-3.

Résumé. — Le présent rapport décrit les résultats d'une comparaison internationale d'affaiblissement sur guide d'ondes R 140 (WG 18, WR 62) à la fréquence de 15 GHz (comparaison GTRF 75-A3). Cette comparaison avait été décidée et organisée par le Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences du Comité Consultatif d'Électricité (CCE), sous l'égide du Comité International des Poids et Mesures (CIPM). Cinq laboratoires nationaux y ont participé : l'IEN (Italie), le NBS (États-Unis d'Amérique), l'OMH (Hongrie), le RSRE (Royaume-Uni) et la PTB (République Fédérale d'Allemagne), jouant le rôle de laboratoire pilote. Les cinq étalons voyageurs — fabriqués et distribués par les participants — ont des affaiblissements nominaux de 0,01 dB, 0,1 dB, 10 dB, 20 dB et 40 dB. Les principales caractéristiques des instruments et la méthode de mesure utilisée sont brièvement décrites. Les résultats des mesures sont indiqués dans plusieurs tableaux et figures, et discutés. Les incertitudes totales vont de $\pm 0,0002$ dB (à 0,01 dB) à près de $\pm 0,1$ dB (à 40 dB pour le cas le plus défavorable). La répétabilité et le comportement à long terme des étalons sont excellents, à l'exception de l'étalon voyageur de 10 dB.

ANNEXE E 9

Rapport final de la comparaison internationale de puissance de crête laser à 10,6 μm

(Comparaison N° 78-8)

par R.W. YELL

National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

Résumé du document GT-RF/86-1

par J.G. EDWARDS, P.A. SMITH et D.A.G. RODDIE (NPL)

Cette comparaison a été entreprise sur proposition du NPL, l'autre participant étant le NBS, dans le but de déterminer si un récepteur à entraînement par les photons de type nouveau, équipé de quatre électrodes (¹) pouvait constituer un meilleur étalon de transfert que les récepteurs industriels utilisés précédemment. Ce nouveau récepteur devrait avoir des électrodes plus stables et une sensibilité plus uniforme sur l'ouverture effective. Trois récepteurs ont été préparés au NPL; leur sensibilité rapportée à l'entrée et leur transmission ont été mesurées. Deux d'entre eux ont été envoyés au NBS pour y être mesurés et le troisième a été conservé au NPL comme témoin. La résistance et la transmission à 10,6 μm ont été mesurées afin de dépister tout dommage éventuel durant le transport ou le contrôle. Les récepteurs ont d'abord été mesurés au NPL en septembre-octobre 1983, puis au NBS en novembre-décembre 1983, et de nouveau au NPL en janvier 1984.

Systèmes de mesure

Dans le système utilisé au NBS (²), l'énergie de l'impulsion est mesurée à l'aide d'un calorimètre, en utilisant une séparatrice dont le facteur de réflexion est mesuré séparément avec une paire de calorimètres interchangeables. Les mesures ont une incertitude systématique de $\pm 4\%$ et une incertitude aléatoire (niveau de confiance de 95%) de $\pm 1,5\%$.

Dans le système du NPL ⁽³⁾ l'énergie de l'impulsion est mesurée en projetant l'image d'une ouverture entièrement éclairée par le faisceau laser soit sur le récepteur à entraînement par les photons, soit sur un calorimètre, après passage à travers la séparatrice d'un moniteur d'énergie utilisé pour compenser les variations de l'énergie du laser, d'impulsion en impulsion. Les mesures ont une incertitude systématique de $\pm 2,8\%$ et une incertitude aléatoire (niveau de confiance de 95%) de $\pm 3,5\%$.

Résultats

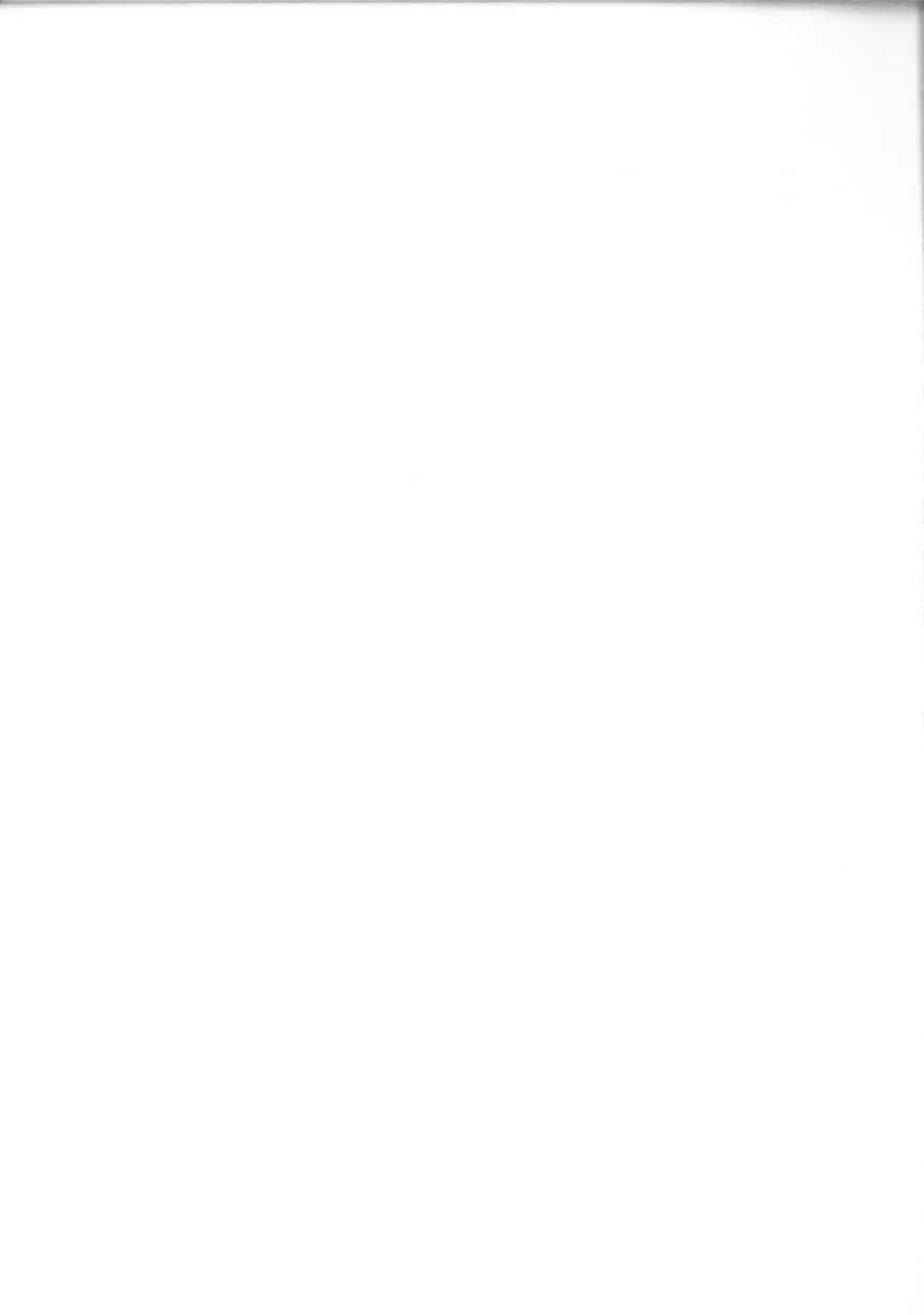
Le récepteur témoin conservé au NPL a varié de façon importante durant la période des essais, sans raison apparente. Toutefois, d'après les mesures faites au NPL, les étalons voyageurs ont peu varié.

La comparaison des mesures du NPL et du NBS pour les deux récepteurs a montré un écart moyen de 12% entre les deux systèmes, ce qui dépasse de loin les incertitudes combinées estimées. Cela est d'autant plus significatif que la répétabilité des mesures effectuées sur les récepteurs au NPL était de l'ordre de 0,5%.

Cette divergence pourrait s'expliquer par le fait que (a) l'un ou l'autre des systèmes de mesure soit non-linéaire, ou (b) les sources d'erreurs systématiques ne soient pas entièrement comprises. Il est de toute évidence nécessaire de poursuivre l'étude de l'équipement et des techniques utilisés de façon à identifier l'origine de cette divergence et permettre une réduction notable des incertitudes estimées.

Références

- [1] EDWARDS, J.G., RODDIE, A.G. and SMITH, P.A. Improved electrodes for photon-drag detectors. *J. Phys. E*, **16**, 1983, pp. 526-531.
 - [2] SIMPSON, P.A. A system for measuring the characteristics of high peak power detectors of pulsed CO₂ radiation. *Natl. Bur. Stand. (US) Tech. Note*, **1023**, 39 pages.
 - [3] EDWARDS, J.G. and SMITH, P.A. Properties of some diffusers for CO₂ lasers. *J. Phys. E*, **14**, 1981, pp. 1326-1328.
-



Notice for the reader of the English version

In order to make the reports of the various Comités Consultatifs more accessible to the many readers who are more familiar with the English language than with the French, the Comité International des Poids et Mesures has decided to publish an English version of these reports. The reader must however be aware that the official report is always the French one. The English version is published for convenience only. If any matter gives rise to controversy, or if an authoritative reference is needed, the French text must be used. This applies especially to the text of the recommendations submitted to the Comité International des Poids et Mesures.

Avertissement au lecteur de la version anglaise

Afin de rendre plus facile l'accès aux rapports des divers Comités Consultatifs pour de nombreux lecteurs qui sont plus familiers avec la langue anglaise qu'avec la langue française, le Comité International des Poids et Mesures a décidé de publier une version en anglais de ces rapports. Le lecteur doit cependant prendre garde au fait que le rapport officiel est toujours celui qui est rédigé en français. La version anglaise n'est publiée que pour faciliter la lecture. Si un point quelconque soulève une discussion, ou si une référence autorisée est nécessaire, c'est toujours le texte français qui doit être utilisé. Ceci s'applique particulièrement au texte des recommandations proposées au Comité International des Poids et Mesures.



NOTE
ON THE ORGANS OF
THE CONVENTION DU MÈTRE

The Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) was set up by the Convention du Mètre signed in Paris on 20 May 1875 by seventeen States during the final session of the Diplomatic Conference of the Metre. This Convention was amended in 1921.

BIPM has its headquarters near Paris, in the grounds (43 520 m²) of the Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) placed at its disposal by the French Government; its upkeep is financed jointly by the Member States of the Convention du Mètre*.

The task of BIPM is to ensure worldwide unification of physical measurements; it is responsible for :

- establishing the fundamental standards and scales for measurement of the principal physical quantities and maintaining the international prototypes;
- carrying out comparisons of national and international standards;
- ensuring the co-ordination of corresponding measuring techniques;
- carrying out and co-ordinating determinations relating to the fundamental physical constants that are involved in the above-mentioned activities.

BIPM operates under the exclusive supervision of the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) which itself comes under the authority of the Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM).

The Conférence Générale consists of delegates from all the Member States of the Convention du Mètre and meets at present every four years. At each meeting it receives the Report of the Comité International on the work accomplished, and it is responsible for :

- discussing and instigating the arrangements required to ensure the propagation and improvement of the International System of Units (SI), which is the modern form of the metric system;
- confirming the results of new fundamental metrological determinations and the various scientific resolutions of international scope;
- adopting the important decisions concerning the organization and development of BIPM.

The Comité International consists of eighteen members each belonging to a different State; it meets at present every year. The officers of this committee issue an Annual Report on the administrative and financial position of BIPM to the Governments of the Member States of the Convention du Mètre.

The activities of BIPM, which in the beginning were limited to the measurements of length and mass and to metrological studies in relation to these quantities, have been extended to standards of measurement for electricity (1927), photometry (1937), and ionizing radiations (1960). To this end the original laboratories, built in 1876-1878, were enlarged in 1929 and two new buildings were constructed in 1963-1964 for the ionizing radiation laboratories.

* As of 31 December 1986 forty-seven States were members of this Convention: Argentina (Rep. of), Australia, Austria, Belgium, Brazil, Bulgaria, Cameroon, Canada, Chile, China (People's Rep. of), Czechoslovakia, Denmark, Dominican Republic, Egypt, Finland, France, German Democratic Rep., Germany (Federal Rep. of), Hungary, India, Indonesia, Iran, Ireland, Israel, Italy, Japan, Korea (Dem. People's Rep.), Korea (Rep. of), Mexico, Netherlands, Norway, Pakistan, Poland, Portugal, Romania, Spain, South Africa, Sweden, Switzerland, Thailand, Turkey, U.S.S.R., United Kingdom, U.S.A., Uruguay, Venezuela, Yugoslavia.

Some forty physicists or technicians are working in the BIPM laboratories. They are mainly conducting metrological research, international comparisons of realizations of units and the checking of standards used in the above-mentioned areas. An annual report published in *Procès-Verbaux des séances du Comité International* gives the details of the work in progress. BIPM's annual appropriation is of the order of 14 327 000 gold francs, approximately 26 000 000 French francs (in 1986).

In view of the extension of the work entrusted to BIPM, CIPM has set up since 1927, under the name of *Comités Consultatifs*, bodies designed to provide it with information on matters that it refers to them for study and advice. These *Comités Consultatifs*, which may form temporary or permanent Working Groups to study special subjects, are responsible for co-ordinating the international work carried out in their respective fields and proposing recommendations concerning units. In order to ensure worldwide uniformity in units of measurement, the *Comité International* accordingly acts directly or submits proposals for sanction by the *Conférence Générale*.

The *Comités Consultatifs* have common regulations (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 31, 1963, p. 97). Each *Comité Consultatif*, the chairman of which is normally a member of CIPM, is composed of delegates from the major metrology laboratories and specialized institutes, a list of which is drawn up by CIPM, as well as individual members also appointed by CIPM and one representative of BIPM. These committees hold their meetings at irregular intervals; at present there are eight of them in existence:

1. The *Comité Consultatif d'Électricité (CCE)*, set up in 1927.
2. The *Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR)*, new name given in 1971 to the *Comité Consultatif de Photométrie* set up in 1933 (between 1930 and 1933 the preceding committee (CCE) dealt with matters concerning Photometry).
3. The *Comité Consultatif de Thermométrie (CCT)*, set up in 1937.
4. The *Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM)*, set up in 1952.
5. The *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS)*, set up in 1956.
6. The *Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants (CCEMRI)*, set up in 1958. In 1969 this committee established four sections: Section I (Measurement of X and γ rays, electrons); Section II (Measurement of radionuclides); Section III (Neutron measurements); Section IV (α -energy standards). In 1975 this last section was dissolved and Section II made responsible for its field of activity.
7. The *Comité Consultatif des Unités (CCU)*, set up in 1964 (this committee replaced the « Commission for the System of Units » set up by the CIPM in 1954).
8. The *Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM)*, set up in 1980.

The proceedings of the *Conférence Générale*, the *Comité International*, the *Comités Consultatifs*, and the *Bureau International* are published under the auspices of the latter in the following series:

- *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* (this collection for private distribution brings together articles published in scientific and technical journals and books, as well as certain work published in the form of duplicated reports).

The *Bureau International* also publishes monographs on special metrological subjects and, under the title « Le Système International d'Unités (SI) », a booklet, periodically up-dated, in which all the decisions and recommendations concerning units are collected.

The collection of the *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (22 volumes published between 1881 and 1966) ceased in 1966 by a decision of CIPM.

Since 1965 the international journal *Metrologia*, edited under the auspices of CIPM, has published articles on the more important work on scientific metrology carried out throughout the world, on the improvement in measuring methods and standards, on units, etc., as well as reports concerning the activities, decisions, and recommendations of the various bodies created under the *Convention du Mètre*.



AGENDA
for the 17th Meeting

I. — Josephson Effect

- A. Review of the values of the Josephson frequency to voltage ratio $2e/h$ used by the national laboratories to maintain their representations of the volt, and the accuracies achieved.
- B. $2e/h$
 - 1. Review of the present values of $2e/h$, in SI units, obtained by direct or indirect means, with their uncertainties.
 - 2. Prospects for future SI values of $2e/h$ with their expected uncertainties and dates of availability.
- C. Survey of techniques for accurate voltage standards.
 - 1. Observed agreement among those national voltage standards that are based on the Josephson effect.
 - 2. Estimation of transfer uncertainties using standard cells and Zener-diode devices.
 - 3. Use and availability of arrays of Josephson junctions.
- D. Further comparisons of national voltage standards and Josephson apparatus.
- E. Discussion of the possible adoption of a new value for the Josephson frequency to voltage ratio to be used in maintaining national voltage standards; mechanism for establishing a common value.

II. — Quantum Hall Effect

- A. Review of the values and accuracies of the realizations of the quantized Hall resistance $R_H = h/e^2$ in terms of the representations of the ohm in the national laboratories (preferably referred to a convenient common date such as January 1, 1986).
- B. $R_H = h/e^2$
 - 1. Review of the present values of R_H , in SI units, obtained by direct or indirect means, together with their uncertainties.
 - 2. Prospects for future SI values of R_H with their expected uncertainties and dates of availability.

C. Survey of techniques used for standards of resistance and capacitance.

1. Results of the 14th comparison of national standards of resistance; agreement among realizations of the ohm.
2. Results of the 3rd international comparison of 10 pF capacitors; agreement among realizations of the farad.
3. Agreement among the present values of R_H in SI and laboratory units.
4. Estimation of transfer uncertainties using standard resistors and capacitors.
5. Precautions to observe owing to the frequency dependence of resistors and capacitors used in ohm determinations.
6. Precautions to observe in characterizing quantum-Hall-resistance (QHR) samples in order to assure that the two-dimensional electron gas is adequately quantized.
7. Availability of QHR samples.

D. Future comparisons

1. International comparisons of 1 Ω resistors at the BIPM.
2. International comparisons of 10 k Ω resistors at the BIPM.
3. International comparisons of 10 pF capacitors.
4. Bilateral comparisons.

E. Discussion of the possible adoption of a value for the quantized Hall resistance to be used in maintaining national resistance standards; mechanism for establishing a common value.

III. — Work at the BIPM.

IV. — Report of the Working Group on Radiofrequency Quantities.

V. — Miscellaneous subjects:

Summary of the relevant activities and current research programs of the national laboratories.

Future tasks of the CCE.



REPORT
OF THE
COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ
(17th Meeting — 1986)
TO THE
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

by J. VANIER, Rapporteur

The Comité Consultatif d'Électricité (CCE) held its seventeenth meeting on the 16th, 17th and 18th of September 1986 at the Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon de Breteuil, at Sèvres. In all, six sessions were held.

The following persons were present :

E. AMBLER, President of the CCE.

The delegates from member laboratories :

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung [ASMW],
Berlin (W. SCHLESOK).

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield (I.K.
HARVEY).

Electrotechnical Laboratory [ETL], Ibaraki (K. SHIDA).

Institut de Métrologie D.I. Mendéléev [IMM], Leningrad
(Y. TARBAYEV, A.B. DIATLEV).

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris [IEN], Turin
(S. D'EMILIO, D. ANDREONE).

Laboratoire Central des Industries Électriques [LCIE], Fontenay-
aux-Roses (J. OSWALD, R. KNOSP, L. ÉRARD).

National Bureau of Standards [NBS], Gaithersburg (B.N. TAYLOR).

National Institute of Metrology [NIM], Beijing (ZHANG DESHI).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (O.C. JONES,
B.P. KIBBLE).

National Physical Research Laboratory [NPRL], Pretoria (W.M.P.
MARAIS).

National Research Council of Canada [NRC] Ottawa (B.M. WOOD,
J. VANIER).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig
(V. KOSE).
Van Swinden Laboratorium [VSL], Delft (R. KAARLS,
K.J.P.M. HARMANS).

The Director of the BIPM (P. Giacomo).

Invited guest :

Statens Provningsanstalt, Borås (H. NILSSON).

Also attending the meeting : A.E. BAILEY, Chairman of the Working Group on Radiofrequency Quantities, T.J. QUINN, Deputy Director of the BIPM, T.J. WITT, F. DELAHAYE, D. REYMANN, T. ENDO (working guest at the BIPM), G. LECLERC, metrologist emeritus (BIPM).

Sent regrets :

Office Fédéral de Métrologie [OFMET], Wabern (W. SCHWITZ).
J. TERRIEN, Director Emeritus of the BIPM.

Absent :

Institut National de Métrologie de la Roumanie [INM], Bucarest.

The President of the CCE and the Director of the BIPM welcomed the participants. Mr. Vanier was appointed rapporteur. The revised provisional agenda was adopted.

In the expectation that discussion of Item I would take most of the day of September 16, it was agreed that Item IV, « Report of the Working Group on Radiofrequency Quantities » would be discussed as the first item on September 17 before Item II, the quantum Hall effect.

1. Reports from the laboratories

A total of 59 working documents from various laboratories were presented to the CCE. A list of these documents is given in Appendix E 1. In view of the length and the number of these documents and the limited time available for the meeting, it was decided that no formal presentation of the individual laboratory contributions would be made. In particular, Items I and II, the Josephson effect and the quantum Hall effect, were the principal elements of the agenda and the subjects of a considerable quantity of information in the documents. It was therefore agreed that a more wieldy approach was to use tables and figures which compile and summarize the available data in a more orderly way. Such tables and figures were prepared by T.J. Witt and B.N. Taylor. They are given in Appendices E 2 and E 3. These data

are a summary of various documents submitted to the CCE as well as some other information available at the time of compilation, particularly, preprints of manuscripts submitted for publication in the proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements held at NBS, Gaithersburg, June 23 to 27, 1986. The President set the end of the meeting, i.e., September 18th, as the deadline for accepting new data for the tables and figures. Before entering into a discussion of the first item on the agenda, the President stressed the importance of the CCE recommendations relative to adoption of values for the frequency to voltage ratio in the Josephson effect and for the quantized Hall resistance R_H in the quantum Hall effect. In particular, he emphasized the possibly profound effect on science and industry of changes, of the size contemplated, in the values of the national representations of the volt. He indicated that in the choice of particular values it was more important to have international uniformity in definition and usage than an exact agreement with SI.

2. Josephson effect

Document CCE/86-46 had been prepared to facilitate discussion of this item. The first part of that document can be found in Appendix E2 (*see* p. E 111). The figure and table numbers mentioned hereafter refer to this Appendix.

A summary of selected available data related to the Josephson effect is given in Tables E2-1 to E2-5. Figures E2-1 and E2-2 are graphic representations of the data of Table E2-2. Tables E2-1 and E2-2 were presented by Mr. Taylor. Table E2-1 gives the values of the frequency to voltage ratio adopted by various national standards laboratories. The diversity is evident. The table also indicates the uncertainties* claimed by the various laboratories in their best measurements of the emf of a standard cell in terms of their adopted value of the quotient. It was emphasized that a relative uncertainty of the order of 1×10^{-7} can often be bettered.

Table E2-2 summarizes the results of determinations of $2e/h$ in SI units. It was noted that the data are not all independent. Data in items 3 to 8 are obtained from either volt or ampere balances. Those in items 9 to 17 are obtained from various combinations of fundamental constants and are independent of the previous electrical measurements.

(*) All uncertainties in this report are meant to be one-standard-deviation estimates.

The tabulated quantity, Δ , is related to the value of the frequency to voltage ratio previously recommended by the CCE in the following way :

$$\Delta = \left[\frac{483\,594 \text{ GHz/V} - 2e/h}{2e/h} \right] \times 10^6.$$

To more easily appreciate the agreement among the various determinations of $2e/h$, Fig. E2-1 displays graphically, in order, starting from the bottom of the figure, all 17 values of Δ with their uncertainties. The dotted vertical line on the left indicates the value recommended by CODATA in 1986. Fig. E2-2 represents, on an expanded scale, this recommended value of $2e/h$ along with five of the most accurate, essentially independent, values from Table E2-2. Specifically, it includes, beginning from the bottom of the figure, items 3, 4, 11, 9 and 10 combined, and 12.

The weighted mean and standard deviation, indicated by the dashed and solid lines respectively, of these five measurements are :

$$\begin{aligned} 2e/h &= (483\,597,786 \pm 0,086) \text{ GHz/V} \\ &= 483\,594 [1 + (7,83 \pm 0,18) \times 10^{-6}] \text{ GHz/V.} \end{aligned}$$

Table E2-3 was prepared by Mr. Witt in order to give an idea of the expected increase in the accuracy of determining $2e/h$ in the future. The approximate expected uncertainty and date of availability are given. It appears from this table and from verbal statements from participants at the meeting that some accurate new data can be expected relatively soon. These new data should contribute to further improve our knowledge of the value of $2e/h$ in SI units.

Table E2-4 presented by Mr. Witt indicates the level of agreement between voltage standards based on the Josephson effect of four laboratories. In these experiments the actual «Josephson» apparatus was transported. It was noted that in all cases the relative difference between Josephson voltage standards was no worse than $7,2 \times 10^{-8}$. Table E2-5 gives another indication of the agreement between Josephson voltage standards implemented in various laboratories, the comparisons being made by means of transportable standard cells or Zener-diode references. From the results in the fifth column, it can be seen that discrepancies as great as $0,68 \mu\text{V}$ were observed between the measured and expected differences between laboratory representations of the volt. Furthermore, there is a rather high dispersion in these results. The assumption that the uncertainties in the realizations of standards based on the Josephson effect given in Table E2-1 are correct leads to the conclusion that the discrepancies and dispersion originate in the instability of the transfer standards.

Supplementary data in relation to transportable standards, based on experiments done by the NBS using standard cells or Zener diodes, are shown in Fig. E2-3 and Table E2-6. Fig. E2-4 gives further information on the observed drift in two Zener-diode voltage standards.

The presentation of these results produced a long discussion. One main conclusion is that in international comparisons of laboratory representations of the volt using methods other than transportable Josephson apparatus, a dispersion of the order of $0,5 \times 10^{-6}$ should be expected in the results. Apart from their obvious connection to the comparison of standards based on the Josephson effect, these tables also indicate the transfer accuracy to be expected in calibration services. After considerable discussion on the possibility of recommending transfer procedures or new comparisons, Recommendation E 1 (1986) was unanimously adopted (*see* page E 98).

The recent availability, although limited, of Josephson arrays, raised keen interest among the participants. These arrays, which operate at a frequency in the range from 70 to 96 GHz, produce outputs of 1 volt, which solves several problems encountered in the use of single-junction devices. At present, with its arrays, NBS is able to achieve a repeatability over three weeks of 17 nV in the measurement of the 1,018 V output of a reference standard based on a Zener diode. However, an unresolved systematic relative difference of $1,3 \times 10^{-7}$ exists between the NBS's old double-junction Josephson standard and the new array standard (Document CCE/86-29). Other delegates described their progress in this field (PTB, *see* Document CCE/86-53 and ETL, *see* Document CCE/86-39 and Document CCE/86-40). They all appeared to be very optimistic about the prospects of such devices. It was pointed out that Josephson arrays should, in principle, be easily transportable and should facilitate the comparison of laboratory representations of the volt between different institutions. The principal remaining problem is the limited availability of such arrays. The NBS appears to be in a position to supply samples to national laboratories for scientific investigations and members were advised that arrays may soon become available in larger quantities. The BIPM will have a Josephson-array system in the near future and would like to be in position to act as a centre of comparison in about two years (1988).

The question of adoption of a new value for the frequency to voltage ratio provoked a lengthy discussion. Although the problem concerns fundamental constants, it was stressed that it is not necessary that the value adopted be exactly equal to $2e/h$ in SI units. The CCE is primarily concerned with the adoption of a value that can be used worldwide for the maintenance, dissemination and calibration of representations of the volt. This new value should not be changed in

the foreseeable future. New determinations of $2e/h$ and refinements of experiments now under way were heartily encouraged by the committee. It was generally felt that these refinements would confirm present results with improved accuracy. Next, the practical consequences of a change in the representations of the volt of the magnitude anticipated from the existing data were discussed. In view of the size of the changes, many delegates felt that a fairly long lead time must be provided to all laboratories to prepare themselves for the change.

Various suggestions for the implementation of a change in the recommended frequency to voltage ratio were presented. A poll of opinions was made by means of a non-binding vote on the two following approaches :

- 1) a value of the frequency to voltage ratio is proposed and adopted at the present meeting ;
- 2) the committee decides to meet in September 1988 with the intention of adopting a new value for the frequency to voltage ratio for implementation in 1990.

The vote was 4 laboratories in favor of 1) and 11 laboratories in favor of 2).

The following declaration 1986/1 concerning the Josephson effect for maintaining the representation of the volt was subsequently unanimously adopted :

« The Comité Consultatif d'Électricité

recognizes

— that, as an organ of the Convention du Mètre, it has as one of its responsibilities to ensure the propagation and improvement of the SI, the unit system in use throughout the world,

— that world-wide uniformity and constancy over a long period of time of national representations of the volt are of great technical and economic importance to commerce and industry,

— that many national standards laboratories use the Josephson effect to maintain a highly stable representation of the volt but that not all use the same value for the frequency to voltage ratio,

— that the value of this quotient (483 594,0 GHz/V) declared by the CCE in 1972 and which most national laboratories use to maintain representations of the volt is now known to be in error by a significant amount,

— that various laboratories have carried out direct realizations of the volt or determinations of fundamental constants which can yield an indirect value of $2e/h$ in SI units,

— that other national laboratories expect to complete similar realizations or determinations shortly,

is of the opinion

— that the value of the frequency to voltage ratio used to maintain a realization of the volt by means of the Josephson effect must be consistent with the SI,

- that a new value, more consistent with SI, can soon be adopted for use by all laboratories,
- that this new value should be adopted simultaneously by all countries concerned.

In consequence, the CCE

- *establishes* a Working Group charged with making a proposal to the CCE for a new value to be based upon all relevant data that become available before 15th June 1988,
- *decides* to meet in September 1988 with a view to recommending the new value of this quotient to come into effect on 1st January 1990,
- *gives notice* that the new value is likely to be higher than the present one by about 8 parts in 10^6 .

Furthermore, the CCE

- *recommends* that national laboratories vigorously pursue their work on realizations of the volt, the intercomparison of these realizations, and the determination of the constants in question and communicate without delay all their results to the Working Group,
- *recommends* that laboratories do not change their value for this quotient until the new value comes into effect,
- *believes* that the value to be adopted will be sufficiently accurate, in terms of SI, that no further change will be required in the foreseeable future. »

Finally, a working group called the « Working Group on the Josephson Effect » was formed and given a mandate to propose to the CCE a new value of the frequency to voltage ratio based on all relevant data available before 15th June 1988. The members are : Messrs. B.N. Taylor (NBS), T.J. Witt (BIPM), B.P. Kibble (NPL) and R. Kaarls (VSL).

3. Quantum Hall effect

A rather long discussion took place on the subject of the possible adoption of a value for the quantized Hall resistance R_H . (To avoid confusion in this report, the quantity experimentally determined in the quantum Hall effect is denoted by the symbol R_H , the quantized Hall resistance, to clearly distinguish it from the physical constant h/e^2 obtained from fundamental constants and other means.) For convenience, in this report the subject is divided into three parts. To summarize our knowledge on this subject, the tables and figures given in Appendix E 3 (see p. E 122) were prepared by Messrs. Taylor and Witt. The following paragraphs summarize the comments made, questions raised and explanations given during the meeting.

a) R_H in terms of laboratory representations of the ohm (Agenda Item II.A)

This item discusses the ability of a given laboratory to measure R_H in terms of its representation of the ohm (Ω_{Lab}). The data given in Table E3-1 are the relative differences Δ , with their uncertainties ε , between the value of R_H expressed in terms of the representation of the ohm under consideration ($\Omega_{\text{Lab}}, \Omega_{69\text{-BI}}$) on the date t and the reference value of 25 812,8 times this same «unit». In this table, the values corresponding to the representation Ω_{Lab} on the measurement date are given in the 3rd column entitled « Δ and ε for R_H in Ω_{Lab} (on date t)». The differences in Δ values from the various laboratories originate essentially from the values of the representations of the ohm in these laboratories. For those which maintain Ω_{Lab} in the form of groups of standard resistors, the uncertainty in the measurement of R_H in terms of Ω_{Lab} varies from 2×10^{-8} to 15×10^{-8} , where both types (A and B) of uncertainty are included.

b) Comparisons of Ω_{Lab} (Agenda items II.C.1 and II.C.4)

International comparisons of Ω_{Lab} directly affect the agreement between laboratories in the determination of R_H . Pertinent data are summarized in various graphs and figures in Appendix E3.

The results of the 14th comparison of national standards of resistance are summarized in Table E3-2 where Ω_{Lab} is given in relation to $\Omega_{69\text{-BI}}$. Figure E3-1 gives a histogram of the dispersion observed in $\Omega_{\text{Lab}} - \Omega_{69\text{-BI}}$ obtained from each transfer standard participating in two recent international comparisons at the BIPM. The conclusion following from these data is that the present ability to transfer Ω_{Lab} by means of 1 Ω transfer standards is characterized by a random uncertainty of the order of 5×10^{-8} . No type B uncertainties, such as those due to temperature, power, pressure or leakage resistance, are included.

The comparisons through the BIPM allow an evaluation of the difference between Ω_{Lab} as maintained by various laboratories and the determinations of the ohm. These data are also represented in various figures and tables of Appendix E 3.

Table E3-3 gives an evaluation of $\Omega_{69\text{-BI}}$ on 1986-01-01 in terms of the ohm as determined by those laboratories that have realized a calculable capacitor. These results are also represented graphically in Fig. E3-2. A discussion took place on the actual drift rate of Ω_{Lab} to be used in transforming the data from one date to another. The drift rate depends somewhat on which particular points are included in the calculation. Furthermore, laboratories may re-evaluate their drift rates (for example by weighting). The presence of a time-dependent component

in the drift rate was discussed but some participants were doubtful of the importance of such an effect. The data on drift rates for various laboratories are given in Tables E3-4a and E3-4b.

Finally, it is possible to combine the results of determinations of the ohm, especially those of CSIRO (NML), with the results of comparisons such as those shown in Table E3-2 to evaluate the behaviour of Ω_{69-BI} with time. Values of Ω_{69-BI} deduced in this way are shown graphically in Fig. E3-3. The straight line results from a linear least-squares fit, *with weights*, to the values deduced from determinations of the ohm at CSIRO (NML) since 1964. Details of the revised values of the CSIRO's realizations of the ohm are given in Document CCE/86-13. A further slightly revised result from a calculation using unequal weights will appear in the proceedings of CPEM-86.

The relatively good precision realized in the transfer of 1 Ω standards provides the means for an indirect comparison of the realizations of the quantized Hall resistance R_H in terms of laboratory representations of the ohm and its reproducibility from one laboratory to another. In Table E3-1 the fifth column entitled « Δ and ε for R_H in Ω_{69-BI} (on 1986-01-01)» is an indication of this reproducibility. The same data are plotted in Fig. E3-4 giving a direct visual indication of this reproducibility, the common reference being the value of Ω_{69-BI} on 1986-01-01. The weighted standard deviation of the mean is 0,04 $\mu\Omega$.

c) R_H in SI units (Agenda items II.B.1 and II.B.2)

The agreement among the determinations of R_H , expressed in SI units, in various laboratories is shown in Table E3-5 and Fig. E3-5. Four laboratories (CSIRO, ETL, LCIE, NPL) have reported direct independent measurements of R_H in ohms by means of the quantum Hall effect and of a calculable capacitor. The total relative scatter in these four results is of the order of 3×10^{-7} . On the other hand, the difference between the 1986 CODATA value of h/e^2 and R_H as obtained from the most precise direct measurements (CSIRO/NML and NPL) is somewhat better, being approximately 2×10^{-7} as is seen in Table E3-6 and Fig. E3-6. (Note that item 8 of Table E3-6 has the smallest assigned uncertainty and is used as a reference in Fig. E3-6 as indicated by the dashed and solid lines). Projected future absolute determinations of R_H and h/e^2 by various laboratories are summarized in Table E3-7.

Data on laboratory and travelling standards of capacitance were presented in order to summarize the present ability to maintain and compare capacitors which, by means of bridge techniques, could conceivably be used to maintain and compare resistance standards. Table E3-8 summarizes the results of the third international comparison

of representations of the farad (also *see* Appendix E4). Although it shows considerable variation among the representations of the farad, the agreement among those laboratories realizing the ohm by means of the calculable capacitor (*see* Fig. E3-2) is satisfactory, the relative dispersion being about 1×10^{-7} . Fig. E3-7, which indicates the relative behaviour over almost 20 years of the three 10 pF travelling standards made by the NBS, shows that the relative values are predictable to $5,5 \times 10^{-8}$ or better. Comparing the histogram in Fig. E3-8 of the dispersion of the results of determination of $F_{\text{Lab}} - F_{\text{NBS}}$, which has an associated pooled relative standard deviation of $7,5 \times 10^{-8}$, with the corresponding value of $4,5 \times 10^{-8}$ (Fig. E3-1) for resistors indicates that the resistance comparisons have higher relative accuracy. This concluded the presentation of the overview of the present situation of the realization of the ohm and R_{H} and of the ability to compare standards.

Questions similar to those encountered in the case of the Josephson effect were raised. In particular, how accurate should be the evaluation of R_{H} in SI units before a value is adopted? In the discussion it became clear that, as in the case of the Josephson effect, the primary goals are world-wide uniformity, reproducibility and wide usage. According to many participants, however, several questions should be answered before adoption of a value of R_{H} . In particular, the following points were raised: availability of « good » samples and their evolution with time; sample characterization; the exact criteria that may be used to determine if a sample is good or not; the dependence of R_{H} on temperature, material used, carrier concentration, and carrier mobility; possible errors due to rectification at contacts and the effects of the positioning of the Hall electrodes on the results; etc. Details of these considerations can be found in the documents, particularly Documents CCE/86-16, CCE/86-28, CCE/86-35, CCE/86-36 and CCE/86-52.

In view of the fact that new experiments may soon give answers to these questions and also that the exact physical relation between R_{H} and h/e^2 may be better understood in the near future, it was decided unwise to recommend for adoption at this time a value of R_{H} and the following declaration 1986/2 concerning the quantum Hall effect for maintaining a representation of the ohm was approved unanimously:

« The Comité Consultatif d'Électricité

recognizes

— that, as an organ of the Convention du Mètre, it has as one of its responsibilities to ensure the propagation and improvement of the SI, the unit system in use throughout the world,

— that world-wide uniformity and constancy over a long period of time of national representations of the ohm are of great technical and economic importance to commerce and industry,

— that the application of the quantum Hall effect as a means of maintaining a stable representation of the ohm is being developed rapidly in many national standards laboratories,

— that the quantum Hall effect is providing very reproducible results from one laboratory to another, but that the number of usable samples available is insufficient for present needs,

— that experience is leading to tests that provide assurance of both reproducible and accurate results from a selected sample,

— that no laboratory has yet adopted a value of the quantized Hall resistance R_H to maintain its laboratory representation of the ohm,

— that various laboratories have determined R_H in SI units using both the calculable capacitor and determinations of fundamental constants,

— that additional results for R_H in SI units are expected to become available in the near future,

is of the opinion

— that the same value of R_H should be adopted simultaneously by all those laboratories that decide to use the quantized Hall resistance as their representation of the ohm,

— that this value should be consistent with SI,

— that such a value can soon be adopted.

In consequence, the CCE

— *establishes* a Working Group charged with making a proposal to the CCE for a value of R_H to be based upon all relevant data that become available up until 15th June 1988 and with developing detailed guidelines for the proper use of the quantum Hall effect to maintain a representation of the ohm,

— *decides* to meet in September 1988 with a view to recommending the value of R_H to come into effect on 1st January 1990,

— *gives* notice that the adoption of this value for R_H may lead to a change in national and the BIPM representations of the ohm; this change should in general not exceed 2 parts in 10^6 .

Furthermore, the CCE

— *recommends* that national laboratories

— vigorously pursue their work to understand better the quantum Hall effect,

— encourage the increased availability and distribution of good quantum-Hall-effect samples,

— determine the value of R_H in SI units both by the direct realization of the ohm and the determination of appropriate fundamental constants,

— carry out bilateral comparisons as seem appropriate, and communicate without delay all their results to the Working Group,

— *recommends* that the BIPM organize during 1987/88 an international comparison of one-ohm resistance standards in connection with the quantum-Hall-effect work,

— *recommends* that no laboratory should adopt a value of R_H for its representation of the ohm or use the quantum Hall effect to alter the present drift rate until the recommended value comes into effect,

— *believes* that the value to be recommended in 1988 will be sufficiently accurate, in terms of SI, for no change to be required in the foreseeable future. »

Furthermore, in support of this declaration, Recommendation E 2 (1986) was unanimously proposed to the CIPM (see page E 99).

In order to propose to the CCE a value for R_H based on all relevant data available before 15th June 1988, a working group called the « Working Group on the Quantum Hall Effect » was formed. The members are: Messrs. B.N. Taylor (NBS), F. Delahaye (BIPM), T. Endo (BIPM/ETL), V. Kose (PTB), O.C. Jones (NPL), B.M. Wood (NRC).

In response to a question raised concerning action to be taken by those national laboratories not equipped to realize R_H or the Josephson standard, it was suggested that they be urged to apply the results of the new value of the frequency to voltage ratio and the adopted value of R_H on the date to be specified in the future recommendation. These laboratories were, furthermore, encouraged to make use of the calibration and certification services of the BIPM if required.

4. Progress reports on international comparisons

4.1. BIPM: 10 pF capacitance standards (Document CCE/86-2)

This comparison is completed. The results are given in Document CCE/86-2 (see Appendix E 4, page E 137).

4.2. BIPM: Report on the 14th comparison of national standards of electrical resistance (Document CCE/86-1)

This comparison is completed. The results are given in Document CCE/86-1 (see Appendix E 5, p. E 143).

4.3. VSL : Ac-dc transfer standards (Document CCE/86-59)

The Western-European part of the circuit has been completed. No results have been published yet because the world-wide comparison is not finished. The next circuit involves ETL, NIM, CSIRO (NML), NBS, NRC, IMM and ASMW.

4.4. PTB : Ac electrical power measurements (Document CCE/86-54)

The comparison is completed. The results are given in Document CCE/86-54 (see Appendix E 6, page 161) and will be published soon in *Metrologia*.

4.5. PTB : Inductance

The comparison, for various reasons, was conducted on a very small scale. Although the number of participants was limited, interesting results were obtained. The travelling standards are still available. A report will be available in the near future.

5. Report of the Working Group on Radiofrequency Quantities (GTRF)

The Chairman of the GTRF (A.E. Bailey) presented the report (Document CCE/86-47) of the meeting held at the Bureau International des Poids et Mesures the preceding week (10th and 11th September 1986). The report lists the comparisons completed since the last GTRF meeting, the comparisons still under way, the new comparisons to be undertaken and subjects for possible future comparisons. Among the new comparisons scheduled, 86-4 and 86-5, which deal with fibre optics, should be planned jointly by the CCE and the CCPR (Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie) using the good offices of the BIPM. Further comparisons at frequencies up to 1,5 GHz are recommended. The next meeting of the Working Group is scheduled for 1988.

The President thanked Mr. Bailey for his presentation and encouraged the publication of the results of the comparisons in the literature. He mentioned that it appears that the Group is somewhat too ambitious in its projects and encouraged them to be more selective in choosing comparisons. The document on methods of comparisons was welcomed and the President suggested that it be sent to all laboratories involved. The President noticed also that in examining past data he found an overall improvement in the comparison measurements but that there

was still room for progress. He suggested that an examination of the data for the last twenty years be carried out, to which Mr. Bailey agreed, adding that he would prepare a report on the whole subject sometime in the future. It was also suggested that for all matters concerning the GTRF, the persons mentioned in the 1986 Report could be expected to act as points of contact. Finally, Mr. Bailey proposed formally that the NIM (Beijing, China) and the VSL (Delft, the Netherlands) be invited to become full members of the GTRF. These laboratories have up to now acted as guests in the Working Group and their participation has, in fact, been that of full members. This action will simplify matters. The CCE agreed.

Noting that Mr. Bailey has been retired from the NPL for several years now, the President announced that Mr. Bailey has informed him of his intention to step down as Chairman of the GTRF. The President thanked Mr. Bailey for his many years of exceptional service to the Working Group and asked that Mr. Bailey's name remain on the list of those invited to the GTRF meeting. The President of the CCE then named Mr. L. Énard (LCIE) as the new Chairman of the GTRF.

6. Current and future work at the BIPM

A short summary of the activities of the Electricity Section of the BIPM was presented by T.J. Witt, Head of the Electricity Section. Particular attention was given to: a proposal to work on Josephson arrays which will replace the present ageing equipment; continuation of cell calibrations and comparisons with the automatic comparator; international comparisons using Zener diodes at 10 volts as well as 1,018 volts; work on the cryogenic current comparator for one-ohm comparisons as well as 1 : 1, 1 : 10 and 1 : 100 steps; and the investigation of the quantum Hall effect with different samples and its use in the measurement of the drift of Ω_{69-BI} . Mention was also made of work related to implementation of a reference standard consisting of 10 k Ω resistors and its evolution with time, the future automation of 10 k Ω measurements and the future study of power coefficients. Finally, Mr. Witt pointed out that although the BIPM does not have a calculable capacitor, it carries out a number of capacitance calibrations and comparisons and maintains a modest activity in the field of ac/dc transfer. The President thanked Mr. Witt for his presentation.

7. Future international comparisons

Throughout the meeting discussions took place about possible international comparisons that could be carried out to clarify some of the situations encountered, especially in relation to voltage standards and resistors. The discussion on voltage standards gave rise to Recommendation E 1 (1986). It was also agreed that in view of the importance of data on Ω_{Lab} for the 1988 meeting, a comparison of 1 Ω resistors should be carried out. It was stressed that all information on a particular resistor involved in the comparison should be sent to BIPM since extensive knowledge of characteristics normally increases accuracy. Proposals for large-scale international comparisons of resistors of 6 453 Ω , 12 906 Ω and 10 k Ω received little support on the grounds that such resistors do not normally travel as well as 1 Ω resistors and accurate scaling techniques are now available. However, bilateral comparisons at these values were encouraged.

On the question of 10 pF comparisons, it was decided to leave such efforts, for the present, in the hands of individual laboratories concerned.

Finally, on the question of bilateral comparisons in general, it was strongly suggested that the laboratories concerned make their results known to BIPM and also publish them at large to make them known to everyone interested.

8. Miscellaneous subjects

Mr. Quinn made a short report on the changes that will take place in the International Practical Temperature Scale 1968 (IPTS-68). He pointed out that the scale was based on gas thermometry carried out largely in the 1950s and 1960s that has now been shown to be significantly in error. He reported that the changes that will take place are far reaching. Corrections of the order of 5 mK at 20 °C, 30 mK at 100 °C and 0,5 K at 800 °C are expected. These changes are important to the CCE in that temperature-dependent devices will require either appropriate corrections of their characteristics or recalibration. For example, tables of thermocouples will require attention. It was suggested that perhaps the changes in the representations of the volt and the ohm should be done at the same time as the change in the temperature scale. The exact date will be known in 1988 and the IPTS could change in 1990 or 1991.

**Recommendations
of the Comité Consultatif d'Électricité
submitted
to the Comité International des Poids et Mesures**

Transfer of the volt

RECOMMENDATION E 1 (1986)

The Comité Consultatif d'Électricité

recognizing

— that the dissemination and international comparison of the national representations of the volt are carried out traditionally by means of Weston cells and recently also by Zener-diode voltage standards,

— that, on the basis of results at present available, the stability of these standards is inadequate to guarantee, in all cases, the desired accuracy of the transfer of the volt,

— that the resulting uncertainty at present is too great compared with the stability of the representations of the volt maintained by means of the Josephson effect,

recommends

— that laboratories participating in bilateral, multilateral, national or international comparisons, send the results of these comparisons to the BIPM so that the BIPM is able to compile and publish them for combined evaluation,

— that all the laboratories concerned actively pursue the study and improvement of transportable standards with which the volt may be transferred from one laboratory to another : Weston cells, Zener diodes or transportable Josephson-junction systems.

Concerning the quantum Hall effect

RECOMMENDATION E 2 (1986)

The Comité Consultatif d'Électricité,

considering

its declaration 1986/2 and especially :

- the incomplete understanding of the various theoretical and experimental aspects of the quantum Hall effect,
- the insufficient supply of reliable quantum-Hall-effect devices,

recommends

- encouraging studies of sample manufacture and characterization and the publication of the results
- encouraging industry and research laboratories to provide an adequate supply of high-quality quantum-Hall-effect devices for metrological purposes,
- promoting better theoretical and experimental understanding of the quantum Hall effect,
- carrying out comparisons of quantum-Hall-effect devices under the auspices of the BIPM.

Report of the Working Group on Radiofrequency Quantities

The Working Group met at the Pavillon de Breteuil, Sèvres, on the 10th and 11th September 1986.

Present: Mr A.E. BAILEY, Chairman, MM. E. BAVA (IEN), XI DEXIONG (NIM), L. ÉRARD (LCIE), E. GRIFFIN (RSRE), C. HARMANS (VSL), I.K. HARVEY (CSIRO), A. JURKUS (NRC), D.H. RUSSELL (NBS, Boulder), K. SHIDA (ETL), U. STUMPER (PTB), R.W. YELL (NPL).

The Director of the BIPM, P. GIACOMO.

Also present at the meeting: Mr J. TERRIEN, Director emeritus of the BIPM; MM. T. ENDO, G. LECLERC, A. SATRAPINSKY and T. J. WITT (BIPM).

Apologies for absence were received from the ASMW.

Absent: the representatives of IRT and IMM.

No representative of URSI was present at the meeting.

The Working Group wishes to record its sorrow at the death, since its last meeting, of Mr G. Almassy, and its appreciation of his work as representative of IRT.

The chairman and the director of the BIPM welcomed the members of the Working Group. The agenda was tabled and approved.

Mr Érard was appointed as rapporteur.

1. International comparisons completed since the last meeting of the Working Group (March 1983)

Six comparisons have been completed: details are given in Table I.

2. Comparisons almost completed

The status of three comparisons which are completed except for preparation of the final reports are given in Table II.

3. Progress on continuing comparisons

A summary of the state of progress of comparisons arranged in 1975, 1978 and 1983 which are still active is given in Table III.

4. New comparisons

The Working Group carefully considered proposals for new comparisons. The double proposition from ASMW for further comparisons of voltage in $50\ \Omega$ coaxial line up to 1,5 GHz (document GT-

RF/86-9), was discussed but the Group felt that these new comparisons should not be started at the present time as the subject was largely covered by the earlier comparisons 75-A5 and 75-A7.

New comparisons approved by the Working Group are listed in Table IV. The list of participants for each is not intended to be final or complete; other interested laboratories will be welcome to take part and should inform BIPM of their wish to do so.

5. Possible subjects for future comparisons

Table V lists a number of possible topics for future comparisons which the Working Group has noted but which are unlikely to lead to formal proposals in the near future. In some cases it is likely that informal comparisons will be arranged directly between the interested laboratories. The Working Group will not formally sponsor these but it will be interested in receiving reports of the results.

6. Other business

The Working Group considers that a guidance document for the conduct of comparisons is needed, for the use of the responsible staff in pilot laboratories and in other participating laboratories. A draft will be prepared and sent for comment to all those who took part in the meeting of the Group.

7. Date of the next meeting

The Working Group considers that its next meeting should be held in 1989. The exact date will be fixed when the date of the next CCE meeting is known.

September 12, 1986

Rapporteur
L. ÉRARD

Chairman
A.E. BAILEY

TABLE I*

Comparisons completed since the last meeting of the Working Group
(March 1983)

- 72-6 Power in coaxial line at 6 GHz.
(Pilot laboratory: NBS; participants: CSIRO, NPL, LCIE, IEN, RIND, NRC, PTB, OMH).
The final report is given in Document GT-RF/86-6: NBS plans to submit a report for publication in *Electronics Letters*.
- 75-A1 Power at 15 GHz: effective efficiency of waveguide bolometer mounts.
(Pilot laboratory: PTB; participants: LCIE, NBS, NRC, RSRE).
The final results were published in full in BIPM monograph 84/3 and in *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, IM-35, 1986, pp. 116-120.
- 75-A3 Attenuation in waveguide at 15 GHz.
(Pilot laboratory: PTB; participants: IEN, NBS, RSRE, OMH).
The final results are summarized in GT-RF/86-3 (Appendix E 8) and have been published in full in BIPM monograph 85/1. A paper in *Metrologia*, 23, 1986/87, pp. 121-127 was also published.
- 75-A5 Voltage (1 V) in 50 Ω coaxial line at 100, 250, 500 and 1 000 MHz.
(Pilot laboratory: PTB; participants: ASMW, SESC, NBS, CSIRO, OMH, IMM).
The final results are summarized in GT-RF/86-5 and have been published in full in BIPM monograph 84/1 and in *Metrologia*, 20, 1984, pp. 115-126.
- 75-A12 Reflection coefficient (moduli) (voltage standing wave ratio) at 10 GHz.
(Pilot laboratory: RSRE; participants: ETL, IEN, NBS, CSIRO, NRC).
This comparison was reported complete in March 1983 (GT-RF/83-8). The results have now been published in BIPM monograph 84/2 and in *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, IM-34, 1985, pp. 463-466.
- 78-8 Peak laser power at 10,6 μm .
(Participants: NBS, NPL).
The final report is given in GT-RF/86-1 (Appendix E 9). No further publication is planned.

* The list of laboratories mentioned in this table and the following ones can be found on page E 26.

TABLE II

Comparisons nearly completed

- 72-1 Phase shift in waveguide R 100 at 9,0, 10,0 and 11,2 GHz.
(Pilot laboratory: NBS; participants: ETL, CSIRO, RSRE; IEN has withdrawn).
All the laboratories have completed their measurements. NBS will prepare a final report in the near future; publication as a BIPM monograph was suggested as appropriate.
- 78-11 Impedance in coaxial line at 100, 200 and 300 MHz using GR900 connectors.
(Pilot laboratory: RSRE; participants: PTB, NBS, CSIRO, VSL).
All laboratories have completed their measurements. RSRE is preparing a final report (document GT-RF/86-12).
- 78-14 Power (1 mW) in 50 Ω coaxial line at 50 MHz.
(Pilot laboratory: NRC; participants: PTB, NBS, ETL, CSIRO, LCIE, IEN, NPL, VSL, FFV, OMH).
All laboratories have completed their measurements. NRC is preparing a final report for publication as a paper in *IEEE Trans. Instrum. Meas.* (document GT-RF/86-13).

TABLE III

Comparisons in progress

a) Comparisons abandoned

After reviewing the state of progress and the degree of interest shown, the Working Group decided that the following comparisons should be terminated:

- 75-A8 Noise power at 30 MHz.
(Pilot laboratory: CSIRO; participants: NBS, RSRE).
- 78-10 Power flux density at 10 GHz.
(Pilot laboratory: NPL; participants: LCIE, CSIRO, NBS, VSL, IEN).
This will be combined with 83-2 to form a new comparison 86-1.
- 78-12 Q factor at 10 GHz ($1\ 000 < Q < 10\ 000$).
(Pilot laboratory: RSRE; participants: CSIRO, NPL, IEN).
- 83-1 Impedance in 50 Ω coaxial line at 1 MHz and 50 MHz (GR900 connector).
(Pilot laboratory: VSL; participants: PTB, NBS, NPL, CSIRO, SESC).
This will be abandoned in its present form and be replaced by a new comparison 86-2.

83-2 Electric field strength at 750 MHz, close to 10 V/m.
(Pilot laboratory: NPL; participants: VSL, NBS, CSIRO, IEN).
This will be combined with 78-10 to form a new comparison 86-1.

b) Continuing comparisons

75-A4 Reflection coefficient in 50 Ω coaxial line at 500 MHz, 3 GHz and 7 GHz.

(Pilot laboratory: PTB; participants: CSIRO, ETL, NBS, NRC, CSMU, OMH, RSRE, SNIIM, VSL).

Four laboratories have completed their measurements. NIM wishes to participate in the comparison solely for the measurements at 500 MHz (see document GT-RF/86-2).

75-A6 Voltage (100 V) in 50 Ω coaxial line at 30 MHz.

(Pilot laboratory: PTB; participant: NBS).

Measurements are under way at NBS. The comparison will shortly be concluded (document GT-RF/86-2).

75-A7 Voltage (1 mV) in 50 Ω coaxial line at 30 MHz.

(Pilot laboratory: PTB; participants: ASMW, CSIRO, NBS, NIM, OMH, TTL, VSL).

The comparison is under way and four laboratories have completed their measurements (document GT-RF/86-2).

75-A11 Power in coaxial line at 12, 14 and 17 GHz: effective efficiency of bolometer mounts with APC-7 (7 mm) connectors.

(Pilot laboratory: PTB; participants: CSIRO, IEN, LCIE, NBS, NRC, VSL).

Four laboratories have completed their measurements. Because of problems encountered with the travelling standards, PTB will, for the remainder of the comparison, provide a tool and instructions for connecting them to the measuring equipment. NIM wishes to participate in this comparison at the end of 1987; LCIE will send the transfer standards to NIM after completing its measurements (document GT-RF/86-2).

75-A14 Attenuation in 75 Ω coaxial line at 300 MHz with GR900 connectors.
(Pilot laboratory: PTB; participants: NPL, NRC, TTL, VSL).

Two laboratories have completed their measurements (document GT-RF/86-2).

75-B3 Reflection coefficient in 75 Ω coaxial line at 1 GHz.

(Pilot laboratory: NRC; participants: LCIE, NPL, OMH, PTB, TTL, VSL).

The comparison will start shortly. The pilot laboratory intends to provide travelling standards fitted with GR900 connectors unless other connectors compatible with GR900 are agreed by the participants. NPL has confirmed its participation (document GT-RF/86-13).

- 75-C3 Pulse rise time in 50 Ω coaxial line.
(Pilot laboratory: NBS; participants: ETL, NIM*, NPL).
NBS will discuss with the other participants arrangements for starting the comparison.
- 78-1 Attenuation (60 and 100 dB) in 50 Ω coaxial line at 30 MHz.
(Pilot laboratory: PTB; participants: IEN, LCIE, NPL, CSIRO, VSL, FFV, NBS, NIM, OMH, PKN, VNIIFTRI).
This comparison has been arranged under the aegis jointly of BIPM and the EEC Bureau Communautaire des Références (BCR). The BCR part of the comparison has been completed and a report on the results has been distributed to the participants concerned. Six of the remaining laboratories have completed their measurements (document GT-RF/86-2).
- 78-2 Power (10 mW) in 75 Ω coaxial line at 500 MHz (GR900 connectors).
(Pilot laboratory: NRC; participants: LCIE, NPL, OMH, PTB, TTL, VSL).
It is hoped to start the comparison shortly (document GT-RF/86-13).
- 78-5 Horn gain and transverse polarization ratio between 8 and 12 GHz.
(Pilot laboratory: NBS; participants: NPL, TUD, FTZ, IEN, CNET, NRC, CSIRO, ETL).
It was agreed that the frequency range to be covered should be reduced from the figure 4-60 GHz originally planned. VSL has withdrawn from this comparison which is now under way (document GT-RF/86-11).
- 78-7 CW laser power at 10,6 μm .
(Pilot laboratory: NBS; participants: PTB, NPL, ETL, NRC).
The pilot laboratory will soon provide details of the arrangements to the other participants (document GT-RF/86-11).
- 78-9 Laser energy at 1,06 μm .
(Pilot laboratory: NBS; participants: NPL, PTB, ETL, VSL*.)
This comparison is planned to start in 1987 (document GT-RF/86-11).
- 78-13 Noise power in waveguide R100.
(Pilot laboratory: RSRE; participants: CSIRO, ETL, LCIE, NBS, NIM, PTB).
The comparison is under way; three laboratories have completed their measurements (document GT-RF/86-13).
- 83-3 Power at 94 GHz.
(Pilot laboratory: ETL; participants: NBS, RSRE, LCIE).
The comparison is under way; the travelling standards are currently being measured at LCIE (document GT-RF/86-7).

* to be confirmed

- 83-4 Measurement of scattering coefficients (S parameters) by broad-band methods over the band 2-18 GHz.
(Pilot laboratory: RSRE ; participants : NBS, CSIRO, PTB, VSL, NIM).
The pilot laboratory is discussing with the other participants the exact form the transfer standards will take: it is likely that they will be accompanied by a portable computer to ensure that all the results are recorded in a compatible form. PTB and NIM will make measurements only in waveguide over the band 8,2-12,4 GHz (document GT-RF/86-12).

TABLE IV

New comparisons

- 86-1 Power flux density at 2,45 and 10 GHz.
Electric field strength between 300 and 1 000 MHz.
(Pilot laboratory: NPL; participants : IEN, LCIE, NBS, VSL, CSIRO, NRC*, PTB*, NIM*.)
This comparison replaces the previous 78-10 and 83-2, and will start when stable transfer standards are available.
- 86-2 *Q*-factor at frequencies up to 30 MHz.
(Pilot laboratory : NBS ; participants : IEN, LCIE, NIM, PTB, SESC, VSL, CSIRO*.)
This comparison replaces 83-1 and is expected to start shortly.
- 86-3 Complex reflection coefficient in waveguide R320 at 27, 35 and 40 GHz.
(Pilot laboratory: RSRE ; participants, LCIE, NIM, NBS, ETL*, NRC*.)
- 86-4 Laser power at 0,85, 1,3 and 1,55 μm .
(Pilot laboratory: NBS; participants : ETL, LCIE, NPL, VSL, VNIIFTRI*, IEN/CSELT*) (documents GT-RF/86-8 and GT-RF/86-10).
- 86-5 Attenuation (< 50 dB) in fibre optic systems.
(Pilot laboratory : ETL ; participants : NBS, VSL, NPL*, VNIIFTRI*, LCIE*, IEN/CSELT*) (document GT-RF/86-8).
- 86-6 Power in waveguide R220 at 20 GHz ; effective efficiency of bolometer mounts.
(Pilot laboratory: LCIE ; participants : NBS, PTB, NIM*, NRC*, ETL*, RSRE*.)

* to be confirmed

- 86-7 Power in waveguide at 45 GHz.
(Pilot laboratory: NBS; participants: RSRE*, ETL*.)
The transfer standards will preferably be mounted in waveguide R400 with corresponding flanges. This comparison, subject to confirmation by the participants, should start before the next meeting of the Working Group.
- 86-8 Attenuation (< 25 dB) in waveguide R320 at 27, 35 and 40 GHz.
(Pilot laboratory: RSRE; participants: PTB, LCIE, NBS, NRC*.)
This comparison can start after agreement on procedure among the participants.

TABLE V

Possible future topics for comparison

- R1 Horn gain at millimetre wavelengths.
The laboratories expressing an interest were: NBS, NPL, NRC.
- R2 Dispersion in optical fibres (1,2 to 1,6 μm).
VSL expressed interest in this suggestion of NPL.
- R3 Noise power in coaxial line over the band 2-18 GHz.
Interested laboratories: LCIE, NBS, PTB, RSRE.
- R4 Impedance in the band 1-100 MHz. This proposal by RSRE interests the majority of members of the Working Group.
- R5 Measurements at millimetre and sub-millimetre wavelengths (frequencies above 100 GHz).
The Working Group sets no definite upper limit to the range of frequencies with which it deals. It will consider all proposals and expects that comparisons of power and transmission parameters between 100 and 300 GHz will be required fairly soon.
- R6 Broad-band scattering coefficients (S parameters) using type N connectors, over the band 2-18 GHz.
This comparison, complementary to 83-4, will be arranged as an informal comparison between RSRE and NBS. BIPM will be kept informed of progress.
- R7 Reflection coefficient between 75 and 105 GHz (preferred frequency: 95 GHz).
NBS and RSRE will arrange an informal comparison and will keep BIPM informed of progress.

* to be confirmed

Identification of laboratories
(*see* page E 26)

APPENDIX E 1

Working documents submitted to the CCE at its 17th Meeting
(*see* the list of documents on page E 29)



APPENDIX E 2

**A summary of determinations of $2e/h$, representations of the volt using
the Josephson effect and abilities to compare voltage standards**

by Barry N. TAYLOR

National Bureau of Standards, Gaithersburg

and

Thomas J. WITT

Bureau International des Poids et Mesures

(Revision of the part of Document CCE/86-46
referring to the Josephson effect)

(f) Krasnov, K., Masourov, V. and Frantsouz, E. Détermination de $2e/h$ au moyen de l'effet Josephson alternatif à l'I.M.M. *BIPM Com. Cons. Électricité*, **14**, 1975, pp. E92-E96. Gorbatshevich, S. V., Krasnov, K. A., Mazurov, V. P., Satrapinskii, A. F., Frantsuz, E. T. and Yashina, T. V. Equipment for testing stability of the standard cells' emf on the basis of the Josephson effect. *Izmer. Tekh.*, **19**, N° 4, 1976., pp. 59-61. [English transl.: *Meas. Tech.*, **19**, 1976, pp. 570-573.] Gorbatshevich, S. V., Krasnov, K. A. and Mazurov, V. P. Precision comparator for measuring in the range 1-10 mV. *Ibid.*, **23**, N° 5, 1980, pp. 53-56. [English transl.: *Ibid.*, **23**, 1980, pp. 445-449.] Krzhimovskii, V. I., Ainitdinov, K. A., Borovitskii, S. I. and Gokhner, A. S. Reproduction of the volt unit by means of long-lived niobium single-crystal Josephson junctions. *Ibid.*, **26**, N° 2, 1983, pp. 31-32. [English transl.: *Ibid.*, **26**, 1983, pp. 123-126.]

(g) Delahaye, F. Utilisation de l'effet Josephson pour la conservation du volt au LCIE. *Bull. Bur. Natl. Mét.* (France), **36**, April 1979, pp. 25-30. A practical volt transfer standard based on the A.C. Josephson effect. In *Euromas 77*, Precise Electrical Measurement, IEE Conf. Publ. N° 152, London, 1977, p. 7-9.

(h) Field, B. F., Finnegan, T. F. and Toots, J. Volt maintenance at NBS via $2e/h$: A new definition of the NBS volt. *Metrologia*, **9**, 1973, pp. 155-166.

(i) Harvey, I. K. Monitoring the NSL standard of emf using the ac Josephson effect. *Metrologia*, **8**, 1972, pp. 114-124. Cryogenic ac Josephson effect emf standard using a superconducting current comparator. *Metrologia*, **12**, 1976, pp. 47-54. Harvey, I. K., Macfarlane, J. C. and Frenkel, R. B. Long-term monitoring of a group of standard cells by means of the ac Josephson effect. *Metrologia*, **12**, 1976, pp. 55-56.

(j) Hartland, A. A new system for monitoring the national standard of voltage at the NPL. In *Euromas 77*, Precise Electrical Measurement, IEE Conf. Publ. N° 152, London, 1977, pp. 10-12. Hartland, A., Witt, T. J., Reymann, D. and Finnegan, T. F. An international direct comparison of two Josephson-effect voltage standards. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-27**, 1978, pp. 470-474.

(k) Wood, G. H. and Dunn, A.F. The realization of the internationally adopted «Josephson volt» in Canada. *Can. J. Phys.*, **59**, 1981, pp. 363-375. Dunn, A. F. In Precision Measurement and Fundamental Constants II, Taylor, B. N. and Phillips, W. D., editors. *Natl. Bur. Stand. (U.S.), Spec. Publ. 617*, U.S. Government Printing Office, Washington DC, 1984, pp. 385-389. Measurement Assurance. National Research Council of Canada NRCC Report 18843, Nov., 1980, 43 pages.

(l) Kose, V., Melchert, F., Fack, H. and Hetzel, W. Recent progress of the $2e/h$ measurement at PTB. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-21**, 1972, pp. 314-315. Fixpunkt der elektrischen Spannung mit Hilfe des Josephson-Effektes. *PTB Mitt.*, **82**, 1972, pp. 230-232. Référence de tension électrique par l'effet Josephson. *BIPM Com. Cons. Électricité*, **13**, 1972, pp. E61-E65. Kose, V., Melchert, F., Engelland, W., Fack, H., Fuhrmann, B., Gutmann, P. and Warnecke, P. Maintaining the unit of voltage at PTB via the Josephson effect. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-23**, 1974, pp. 271-275. Melchert, F. Monitoring a group of standard cells in a new enclosure by means of the ac Josephson effect. *Metrologia*, **14**, 1978, pp. 167-170.

(m) Based on a Josephson one-volt array. Niemeyer, J., Grimm, L., Meier, W., Hinken, J. H. and Vollmer, E. Stable Josephson reference voltages between 0.1 and 1.3 V for high precision voltage standards. *Appl. Phys. Lett.*, **47**, 1985, pp. 1222-1223.

(n) Kaarls, R., Harmans, C., de Waard, P., Koymans, C. and Schmit, J. Summary of recent work on electrical standards at VSL. Document CCE/83-23 submitted to the 16th Meeting of the Comité Consultatif d'Électricité. Harmans, C. and Kaarls, R. The VSL Josephson voltage monitor I, VSL Report EM-VJOI, April 1978, 33 pages. Document CCE/78-39 submitted to the 15th Meeting of the Comité Consultatif d'Électricité. Harmans, C. J. P. M. and Kaarls, R. The implementation at VSL of a dc voltage monitor using the ac Josephson effect. In *Euromas 77*, Precise Electrical Measurement, IEE Conf. Publ. N° 152, London, 1977, pp. 4-6.

(o) Seppä, H., Immonen, P. and Riihã, J. A computer controlled Josephson voltage standard. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, (to be published). Lahdenperä, K., Seppä, H. and Wallin, P. A transportable Josephson voltage standard. In Precision Measurement and Fundamental Constants II, Taylor, B. N. and Phillips, W. D., editors. *Natl. Bur. Stand. (U.S.), Spec. Publ. 617*, U.S. Government Printing Office, Washington DC, 1984, pp. 493-495.

TABLE E2-2

Values of $2e/h$ in SI units

$$\Delta = [(483\,594\text{ GHz/V} - 2e/h)/(2e/h)] \times 10^6$$

	Δ	Uncertainty in Δ	Comments and references
1.	— 7,59	0,30	1986 CODATA recommended value ^(a)
2.	— 7,86	0,18	1986 CODATA with revised CSIRO result (CCE/86-6) plus new NPL result (CCE/86-26)
3.	— 8,00	0,30	NPL, CCE/86-26, moving coil ampere balance
4.	— 8,07	0,31	CSIRO, CCE/86-6, Hg electrometer volt balance
5.	— 7,1	1,7	University of Zagreb, CPEM 86, volt balance ^(b)
6.	— 3,33	2,39	1986 CODATA input: LCIE volt balance (uncertainty not revised) ^(a,c)
7.	+ 0,54	2,53	1986 CODATA input: weighted mean of 6 direct ampere realizations [NBS (2), NPL (2), VNIIM, ASMW; 1986 CODATA input \bar{K}_Ω used] ^(a)
8.	— 2,02	3,22	1986 CODATA input: weighted mean of 5 direct ampere realizations [NPL high value of $+ (4.71 \pm 4.11)$ deleted; 1986 CODATA input \bar{K}_Ω used] ^(a)
9.	— 7,62	0,54	PTB N_Λ , CPEM 86 [new $\alpha^{-1}(a_c)$ used] ^(d,e)
10.	— 6,86	0,58	NBS N_Λ , CPEM 86 [NBS 1986 CODATA input $M(\text{Si})/\rho(\text{Si})$ and new $\alpha^{-1}(a_c)$ used] ^(f,a,e)
11.	— 8,17	0,67	N_Λ from NBS F and BIPM R_H in Ω_{69-B1} [new $\alpha^{-1}(a_c)$ used] ^(a,e,e)
12.	— 7,23	0,52	1986 CODATA input: NBS, NPL γ'_p (1986 CODATA input \bar{K}_Ω used) ^(a)
13.	— 10,88	0,58	1986 CODATA input: NPL γ'_p (1986 CODATA input \bar{K}_Ω used) ^(a)
14.	— 8,15	0,67	NBS γ'_p , F , and R_H , CCE/86-18
15.	— 6,2	0,8	ASMW γ'_p , CCE/86-25
16.	— 4,63	1,83	1986 CODATA input: NIM γ'_p (1986 CODATA input \bar{K}_Ω used) ^(a)
17.	— 2,65	2,74	1986 CODATA input: USSR γ'_p (1986 CODATA input \bar{K}_Ω used) ^(a)

(a) Cohen, E. R. and Taylor, B. N. The 1986 adjustment of the fundamental physical constants. A report of the CODATA Task Group on Fundamental Constants. *CODATA Bulletin*, N° 63, Pergamon Press, Nov. 1986, 36 pages.

(b) Bego, V., Butorac, J., Gasljevic, G. and Poljanec, K. Volt balance realization of the volt at ETF in Zagreb. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-36**, June 1987, pp. 185-189.

(c) Delahaye, F., Fau, A. and Geneves, G. Absolute determination of the volt using a Kelvin type electrometer. In CPEM 86. 1986 Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest. Dziuba, R. F., editor. IEEE Catalog N° 86CH2267-3, 1986, pp. 144-145; and private communication.

(d) Seyfried, P., Balhorn, R., Kochsiek, M., Kozdon, A., Rademacher, H. J. and Wagenbreth, H. The Avogadro constant — recent results on the molar volume of silicon. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-36**, June 1987, pp. 161-165.

(e) Kinoshita, T. The anomalous magnetic moment of the electron and the QED determination of the fine-structure constant. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-36**, June 1987, pp. 201-204.

(f) Deslattes, R. D., Tanaka, M., Greene, G. L., Henins, A. and Kessler, E. G. Jr. Remeasurement of a silicon lattice period. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-36**, June 1987, pp. 166-169; and private communication.

(g) Witt, T. J., Endo, T. and Reymann, D. The realization of the quantum Hall standard of resistance at BIPM. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-36**, June 1987, pp. 234-239; and Document CCE/86-43.

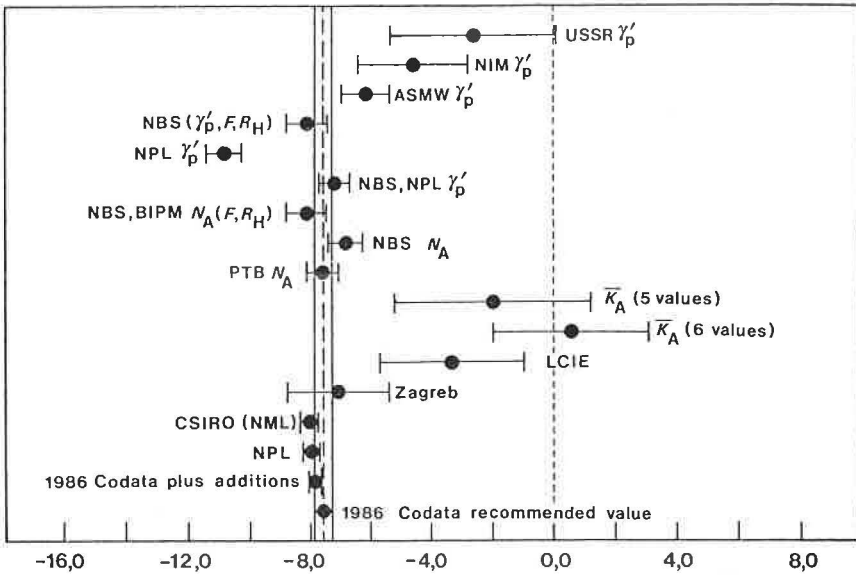


Fig. E2-1. — $\Delta = [(483\,594\text{ GHz/V} - 2e/h)/(2e/h)] \times 10^6$.

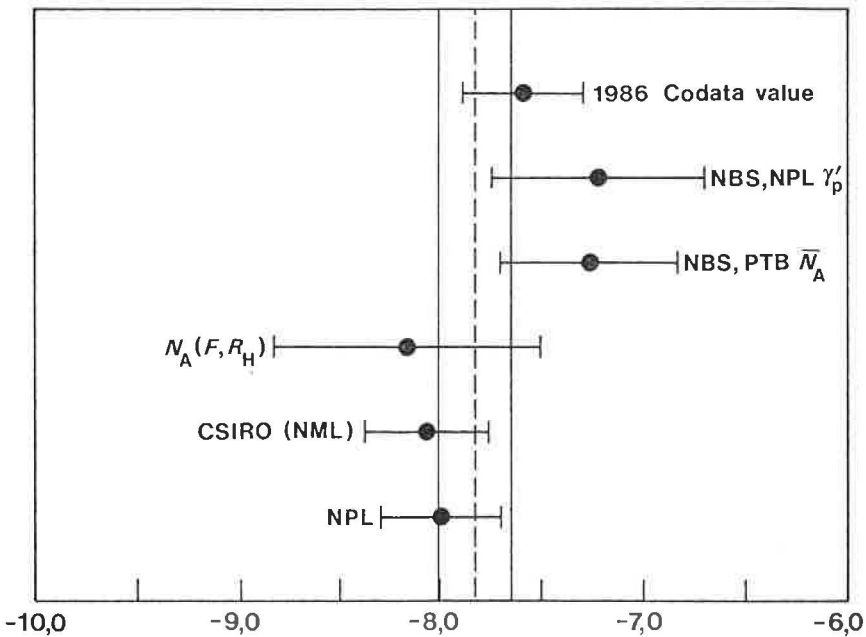


Fig. E2-2. — $\Delta = [(483\,594\text{ GHz/V} - 2e/h)/(2e/h)] \times 10^6$.

TABLE E2-3

*Summary of future determinations of $2e/h$ in SI units **

Source	Method	Expected approximate relative uncertainty $\times 10^6$	Expected date of availability
Univ. of Zagreb	Direct, volt balance	0,5	1988-1989
PTB	Direct, volt balance	0,3	1987
PTB	Indirect, N_A and other constants	0,5	1987
NPL	Direct, via Ω and A	0,1	mid 1987
ETL	Direct, via Ω and A	1,0	1988-1989
NBS	Direct, via Ω and A	0,1	1988-1989
LCIE	Direct, volt balance	1,0	mid 1987
IMM	Indirect, N_A and other constants	0,5	1988
IMM	Flux quantum via levitated mass	?	1988
NRLM	Flux quantum via levitated mass	0,1	1988-1989
CODATA	Indirect, new adjustment of the physical constants	?	after 1991

* Witt, T. J., Report on an informal meeting on values of $2e/h$ and R_H (unpublished) and private communications.

TABLE E2-4

Summary of observed agreement of voltage standards based on the Josephson effect ; comparisons carried out using transported Josephson apparatus of laboratory 1

Laboratories LAB1, LAB2	$\frac{\left[\frac{2e}{h} \right]_{\text{LAB1}} - \left[\frac{2e}{h} \right]_{\text{LAB2}}}{[2e/h]} \times 10^6 (*)$	Date	Reference
BIPM, PTB	0,05 ± 0,05 ₆	April 1975	(^a)
BIPM, NPL	0,072 ± 0,044	April 1978	(^b)
VTT(**), PTB	0,01 ± 0,10	September 1980	(^c)

(*) Here the symbols $[2e/h]_{\text{LAB1,2}}$ denote the realizations of frequency to voltage quotients for voltage standard use.

(**) VTT = Technical Research Centre of Finland.

(^a) Witt, T. J. and Reymann, D. Determination of $2e/h$ at the BIPM. *In Atomic Masses and Fundamental Constants 5*, Plenum, 1976, pp. 457-463.

(^b) Hartland, A., Witt, T. J., Reymann, D., and Finnegan, T. F. An international direct comparison of two Josephson-effect voltage standards. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, IM-27, 1978, pp. 470-474.

(^c) Lahdenperä, K., Seppä, H. and Wallin, P. A transportable Josephson voltage standard. *In Precision Measurement and Fundamental Constants II*, *Natl. Bur. Stand. (U.S.) Spec. Publ.*, 617, 1984, pp. 493-495.

TABLE E2-5

*Results of some comparisons of Josephson apparatus by shipping standard cells or Zener references (indicated by *) between laboratories*

Central date	Quantity measured	Expected (†) value (μV)	Measured value (μV)	Measured minus expected (μV)	Additional uncertainty from the transfer itself (μV)
1976-06-15 (a)	$V_{NPL} - V_{76-BI}$	0 ± 0,037	0,12	0,12	N.A. (Not available)
1976-06-15 (a)	$V_{NPL} - V_{76-BI}$	0 ± 0,037	0,23	0,23	N.A.
1979-12-26 (b,c)	$V_{VSL} - V_{76-BI}$	0 ± 0,046	0,04	0,04	0,020
1979-12-26 (b)	$V_{NRC} - V_{76-BI}$	0 ± 0,10	0,54	0,54	0,22
1979-12-26 (b)	$V_{LCIE} - V_{76-BI}$	1,32 ± 0,10	1,64	0,32	0,037
1982-03-15 (c)	$V_{LCIE} - V_{76-BI}$	1,32 ± 0,10	1,29	- 0,03	N.A.
1982-04-10 (d,e)	$V_{IMM} - V_{NPL}$	4,50 ± 0,057	4,63	0,13	0,13
1982-07-12 (d,e)	$V_{IMM} - V_{NPL}$	4,50 ± 0,057	5,18	0,68	0,094 + ?
1985-04-29 (f)	$V_{LCIE} - V_{76-BI}$	1,32 ± 0,10	1,18	- 0,14	0,11 + ?
1985-05-22 (f)	$V_{PTB} - V_{76-BI}$	0 ± 0,037	0,09	0,09	0,11 + ?
1985-09-13 (g)	$V_{NRC} - V_{CSIRO}$	0 ± 0,13	0,18	0,18	0,04
1985-09-25 (f)	$V_{NPL} - V_{76-BI}$	0 ± 0,037	- 0,14	- 0,14	0,05 + ?
1985-12-15 (f)	$V_{IMM} - V_{VTT}$	4,50 ± 0,051	4,54	0,04	0,022

(†) The quoted one-standard-deviation uncertainty is based on the uncertainties of Table E2-1 and is the minimum to be expected.

(a) *BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, **45**, 1977, p. 43.

(b) *Ibid.*, **49**, 1981, p. 55.

(c) *Ibid.*, **50**, 1982, p. 82.

(d) Harland, A., Harkness, S., Krause, P. J., Galakhova, O. P., Krzhimovskii, V. I. and Korotkova, I. V. An international intercomparison of the UK and the USSR voltage standards maintained with Josephson effect systems. *Metrologia*, **21**, 1985, pp. 165-167. Note that the second NPL-IMM comparison (1982-07-12 central date) was carried out with nude cells rather than cells in a thermoregulated enclosure.

(e) Document CEE/86-3.

(f) Results from a trial comparison intended to evaluate the reproducibility of the travelling standard. This travelling standard was later abandoned following a comparison during which it changed value by more than 1 μV. *BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, **53**, 1985, pp. 90-91; and Witt, T. J., private communication.

(g) Document CCE/86-7.

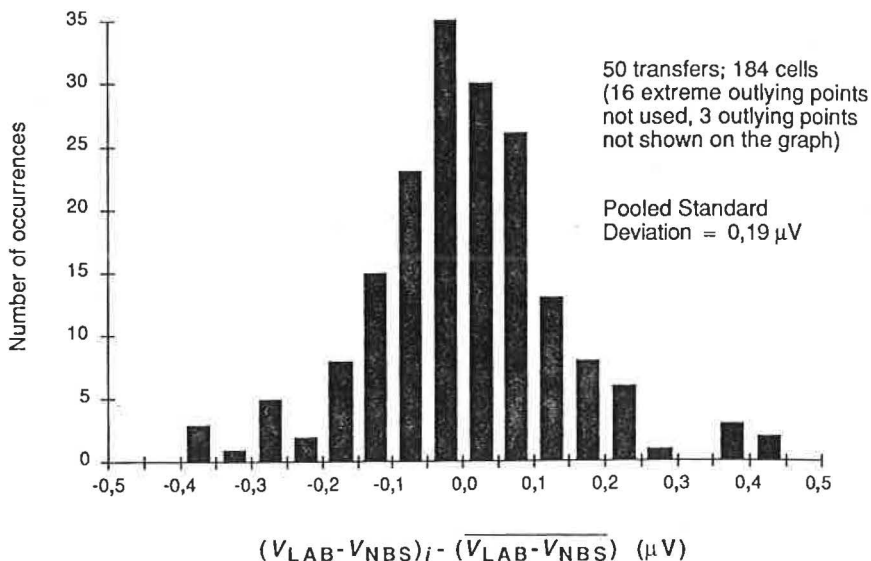


Fig. E2-3. — Dispersion of $V_{LAB} - V_{NBS}$ within a transport enclosure (shipped under power within the U.S. mainly by air freight).

TABLE E2-6

$[(V_{LAB} - V_{NBS})/V_{NBS}] \times 10^6$ determined using three 10 volt solid-state references shipped by air freight.

SN 22 shipped under power; SN 10 & SN 11 shipped not under power

	SN 22	SN 10	SN 11	Mean	Standard deviation
LAB A	- 0,464	- 0,421	- 0,503	- 0,463	0,041
LAB B	- 1,173	- 1,117	- 1,182	- 1,157	0,035
LAB C	- 0,342	- 0,162	- 0,436	- 0,313	0,139
LAB D	+ 1,438	+ 1,461	+ 1,371	+ 1,423	0,047
				Pooled standard deviation	0,078
				Expected standard deviation of a transfer using 3 references	0,045

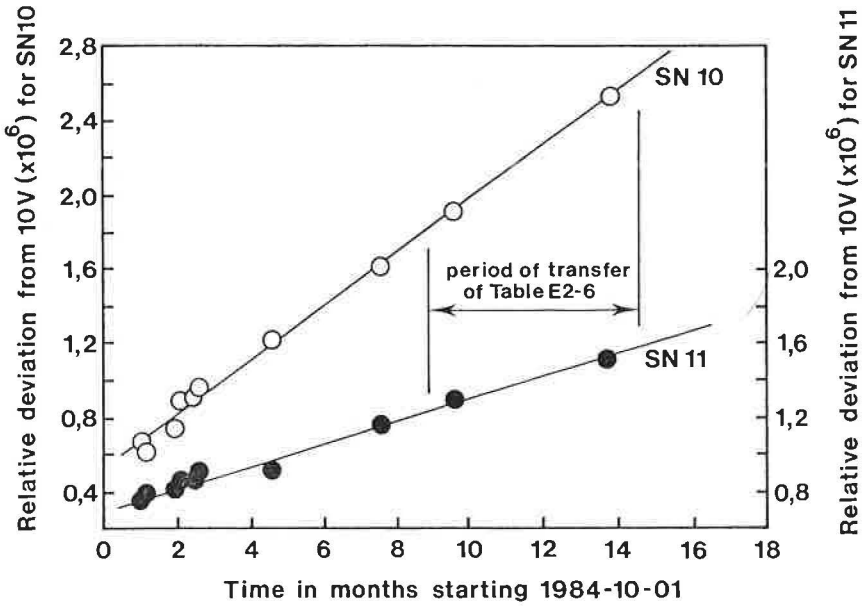


Fig. E2-4. — Long-term stability of solid-state references SN 10 and SN 11.

APPENDIX E 3

**A summary of determinations of the quantized Hall resistance
and abilities to compare resistance standards**

by Barry N. TAYLOR

National Bureau of Standards, Gaithersburg

and

Thomas J. WITT

Bureau International des Poids et Mesures

(Revision of the part of Document CCE/86-46
referring to the quantum Hall effect)

TABLE E3-1

Summary of values of $R_H = h/e^2$ expressed in laboratory and SI units of resistance

$R_H = 25\,812.8\,\Omega \times [1 + \{\Delta \pm \varepsilon\} \times 10^{-6}]$, where $\Omega_L = \Omega_{LAB}$ on date t , Ω_{60-BI} on date t , or Ω as the case may be. All values in Ω are based on the CSIRO result $\Omega - \Omega_{60-BI}$ (1986-01-01) = $(1,627 \pm 0,063)\,\mu\Omega$. (In converting from one set of units to another, only Type A uncertainties have been taken into account.)

Lab.	Measure- ment date, t	Δ and ε for R_H in Ω_{LAB} (on date t)	Δ and ε for R_H in Ω_{60-BI} (on date t)	Δ and ε for R_H in Ω_{60-BI} (on 1986-01-01)	Δ and ε for R_H in Ω	Δ and ε for R_H in Ω_{LAB} (on 1986-01-01)	Comments and references
1. CSIRO	1986-01-01	$0,383 \pm 0,078$ (*) (0,048)	$2,010 \pm 0,049$	$2,010 \pm 0,049$	$0,383 \pm 0,078$	$0,383 \pm 0,078$ (*) (0,048)	CCE/86-14
2. NPL	1986-01-01	$1,452 \pm 0,038$	$1,759 \pm 0,052$	$1,759 \pm 0,052$	$0,132 \pm 0,082$	$1,452 \pm 0,038$	CCE/86-27
3. LCIE	1986-03-01	$0,952 \pm 0,022$	$1,992 \pm 0,068$	$1,982 \pm 0,068$	$0,355 \pm 0,093$	$0,951 \pm 0,022$	CCE/86-15
4. NBS	1986-01-01	$1,752 \pm 0,052$	$1,981 \pm 0,075$	$1,981 \pm 0,075$	$0,354 \pm 0,098$	$1,752 \pm 0,052$	CCE/86-31
5. BIPM	1986-06-01	$1,980 \pm 0,076$	$1,980 \pm 0,076$	$1,954 \pm 0,076$	$0,327 \pm 0,099$	$1,954 \pm 0,076$	CCE/86-43
6. ETL	1986-05-15	$0,139 \pm 0,32$ (*) (0,09)	$1,817 \pm 0,096$	$1,794 \pm 0,096$	$0,167 \pm 0,115$	$0,139 \pm 0,32$ (*) (0,09)	CCE/86-32 and CPEM 86 (*)
7. NRC	1986-04-25	$3,87 \pm 0,09$	$2,167 \pm 0,116$	$2,148 \pm 0,116$	$0,521 \pm 0,132$	$3,867 \pm 0,090$	CCE/86-8 and CPEM 86 (*)
8. OFMET	1986-05-15	$1,848 \pm 0,120$	$1,992 \pm 0,130$	$1,969 \pm 0,130$	$0,342 \pm 0,144$	$1,833 \pm 0,120$	CCE/86-20
9. PTB	1985-06-21	$0,529 \pm 0,105$	$1,835 \pm 0,153$	$1,867 \pm 0,153$	$0,240 \pm 0,165$	$0,525 \pm 0,105$	CCE/86-52
10. VSL	1986-04-02	$1,112 \pm 0,150$	$1,783 \pm 0,179$	$1,777 \pm 0,179$	$0,150 \pm 0,190$	$1,109 \pm 0,150$	Ref. (*)
11.	From most recent α^{-1} (α_0), Kinoshita, CPEM 86 (new value)				$0,221 \pm 0,020$		CPEM 86 (*)

(*) CSIRO and ETL define Ω_{LAB} in terms of Ω as realized by their respective calculable capacitor experiments. Thus, these uncertainties include the uncertainty of the realizations. The number in parentheses is the uncertainty achieved in terms of nominal one-ohm resistance standards and is that used to calculate the uncertainties ε given in the next three columns.

(a) Shida, K., Wada, T., Nishinaka, H., Kobayashi, M., Yonezaki, G., Igarashi, T. and Nemoto, T. Determination of quantized Hall resistance value by using calculable capacitor at the ETL. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-36**, June 1987, pp. 214-217.

(b) Wood, B. M. and D'Iorio, M. Quantum Hall Measurements from 4 K to 20 mK. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-36**, June 1987 (to be published); and private communication.

(c) Harmans, C. J. P. M., private communication.

(d) Kinoshita, T. The anomalous magnetic moment of the electron and the QED determination of the fine-structure constant. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-36**, June 1987, pp. 230-233.

TABLE E3-2

*Summary of the 14th comparison
of national standards of resistance [1]*

Group A, mean date 26 November, 1983

Laboratory	$\Omega_{LAB} - \Omega_{69-BI}$ ($\mu\Omega$)
NPRL (Pretoria)	- 0,12
ASMW (Berlin)	+ 0,06
PTB (Braunschweig)	+ 1,06
NRC (Ottawa)	- 1,86
LCIE (Fontenay-aux-Roses)	+ 0,93
IEN (Turin)	+ 1,45
IMM (Leningrad)	+ 1,45

Group B, mean date 12 February, 1984, except CSIRO

Laboratory	$\Omega_{LAB} - \Omega_{69-BI}$ ($\mu\Omega$)
CSIRO (Lindfield) [2]	+ 1,58
NIM (Beijing)	+ 0,50
NBS (Gaithersburg)	+ 0,19
ETL (Ibaraki)	+ 1,56
VSL (Delft)	+ 0,56
NPL (Teddington)	+ 0,32

Uncertainties [1] (see p. E 157)

1. In the values of the transfer standards expressed in Ω_{69-BI}

Type A	0,013 $\mu\Omega$
Type B	0,01 $\mu\Omega$
	<u>0,015 $\mu\Omega$</u>

Root-sum-square total $s = 0,022 \mu\Omega$

2. In the final results of the comparison, assuming same systematic uncertainties in all laboratories, the total combined (type A and B) uncertainties are

- for laboratory which sent 2 transfer standards $s = 0,046 \mu\Omega$
- for laboratory which sent 3 transfer standards $s = 0,040 \mu\Omega$
- for laboratory which sent 4 transfer standards $s = 0,037 \mu\Omega$

Conclusions

The international comparisons of resistance standards are fundamental to the establishment of published relationships among the national standards. Among other benefits, they allow us to 1) *compare* experimental values of R_H , as in Tables E3-1 and E3-2, 2) *express* values of R_H in terms of determinations of the ohm in the few laboratories which now carry out these measurements, 3) *establish* relations between national standards for normalization purposes and 4) *provide* published bibliographical sources of results available to the general public.

References

- [1] Document CCE/86-1
- [2] Document CCE/86-13 ; mean date for CSIRO result, 1985-03-24.

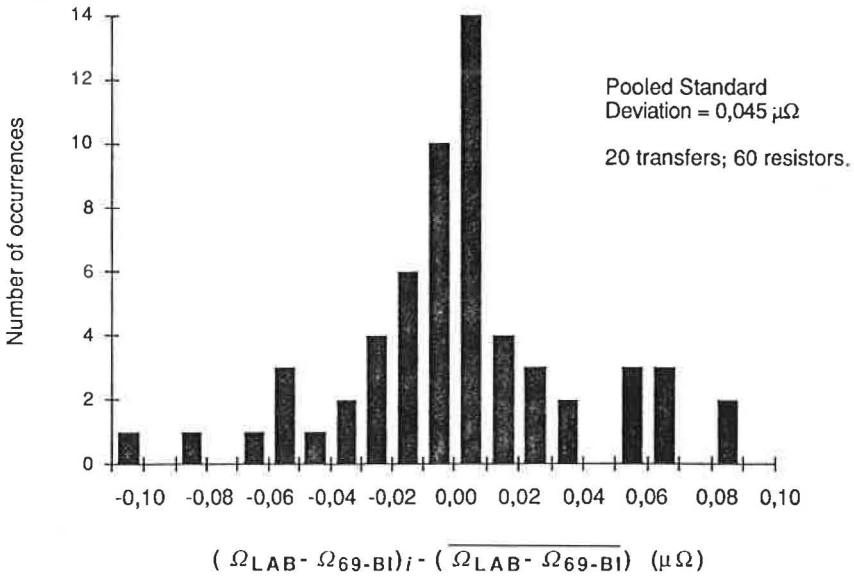


Fig. E3-1.— Dispersion of $\Omega_{Lab} - \Omega_{69-B1}$ for 1979 and 1983-1984 comparisons of national standards of resistance.

TABLE E3-3

Realizations of the ohm

(In converting from Ω_{LAB} to $\Omega_{69,\text{BI}}$, and in extrapolating from $\Omega_{69,\text{BI}}$ to $\Omega_{69,\text{BI}}$ on 1986 January 1, only Type A uncertainties have been taken into account.)

Lab	Measurement date, t	$\Omega_{\text{LAB}} - \Omega$ on date t ($\mu\Omega$)	$\Omega_{69,\text{BI}} - \Omega$ on date t ($\mu\Omega$)	$\Omega_{69,\text{BI}} - \Omega$ on 1986-01-01 ($\mu\Omega$)	Comments and references
1. NBS	1973-12-02	- 0,819 \pm 0,027	- 1,076 \pm 0,048	- 1,823 \pm 0,052	CODATA Bull. 63 (*)
2. CSIRO	1986-01-01	0,000 \pm 0,062	- 1,627 \pm 0,063	- 1,627 \pm 0,063	CEE/86-13
3. NPL	1986-01-01	- 1,049 \pm 0,081	- 1,356 \pm 0,088	- 1,356 \pm 0,088	CCE/86-27
4. LCIE	1986-03-01	- 0,88 \pm 0,22	- 1,920 \pm 0,229	- 1,910 \pm 0,229	CCE/86-15
5. ETL	1986-01-01	0,000 \pm 0,32	- 1,657 \pm 0,322	- 1,657 \pm 0,322	CODATA Bull. 63(*)
6. NPLI	1981-09-21	- 1,007 \pm 0,319	- 1,306 \pm 0,336	- 1,612 \pm 0,336	CODATA Bull. 63 (*)

(*) Cohen, E. R. and Taylor, B. N. The 1986 adjustment of the fundamental physical constants. A report of the CODATA Task Group on Fundamental Constants. *CODATA Bulletin*, N° 63, Pergamon Press, Nov. 1986, 36 pages.

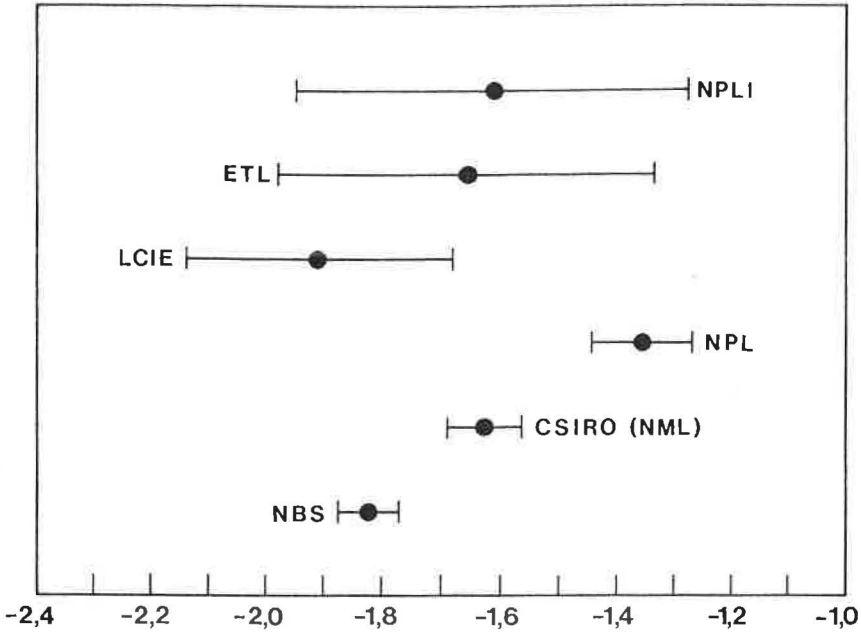


Fig. E3-2.— $\Omega_{69-BI} - \Omega$ on 1986-01-01 ($\mu\Omega$).

TABLE E3-4a

Differences between Ω_{LAB} and Ω_{69-BI} and between Ω_{LAB} and Ω , on 1986 January 1; and laboratory ohm drift rates

[It has been assumed that $\Omega - \Omega_{69-BI}$ (1986-01-01) = (1,627 ± 0,063) $\mu\Omega$ based on the CSIRO result. The uncertainties for $\Omega_{LAB} - \Omega_{69-BI}$ on 1986-01-01 and $d\Omega_{LAB}/dt$ are Type A only.]

Lab	$\Omega_{LAB} - \Omega_{69-BI}$ on 1986-01-01 ($\mu\Omega$)	$\Omega_{LAB} - \Omega$ on 1986-01-01 ($\mu\Omega$)	$d\Omega_{LAB}/dt$ ($\mu\Omega/\text{year}$)
1. ASMW	0,114 ± 0,042	- 1,513 ± 0,076	- 0,0472 ± 0,0088
2. BIPM	0,000 ± 0,000	- 1,627 ± 0,063	- 0,0618 ± 0,0015
3. ETL	1,657 ± 0,032	0,030 ± 0,071	0,000
4. IEN	1,721 ± 0,077	0,094 ± 0,099	0,0047 ± 0,0052
5. IMM	1,822 ± 0,162	0,195 ± 0,174	0,0566 ± 0,0112
6. LCIE	1,031 ± 0,064	- 0,596 ± 0,089	- 0,0100 ± 0,0055
7. NBS	0,229 ± 0,055	- 1,398 ± 0,084	- 0,0642 ± 0,0065
8. NIM	0,658 ± 0,113	- 0,969 ± 0,129	- 0,0308 ± 0,0151
9. CSIRO	1,627 ± 0,0104	0,000 ± 0,062	0,000
10. NPL	0,307 ± 0,036	- 1,319 ± 0,072	- 0,0599 ± 0,0024
11. NRC	- 1,719 ± 0,072	- 3,346 ± 0,095	- 0,0102 ± 0,0061
12. PTB	1,342 ± 0,115	- 0,285 ± 0,131	0,0081 ± 0,0079
13. VSL	0,668 ± 0,097	- 0,959 ± 0,115	- 0,0263 ± 0,0117

TABLE E3-4b

Time-dependent difference between Ω_{LAB} and $\Omega_{69-\text{BI}}$

$\Omega_{\text{LAB}} - \Omega_{69-\text{BI}} = a + b(t + t_0)$, t measured from 1986-01-01 in years, a and b uncorrelated (*).

Lab	a ($\mu\Omega$)	b ($\mu\Omega/\text{year}$)	t_0 (years)
1. ASMW	0,0533 \pm 0,0210	0,01464 \pm 0,00871	4,1670
2. BIPM		Not Applicable	
3. ETL	1,3418 \pm 0,0147	0,05592 \pm 0,00504	5,6299
4. IEN	0,8386 \pm 0,0386	0,06652 \pm 0,00502	13,2708
5. IMM	0,3000 \pm 0,0780	0,11847 \pm 0,01105	12,8460
6. LCIE	0,4920 \pm 0,0326	0,05187 \pm 0,00526	10,4006
7. NBS	0,2464 \pm 0,0276	- 0,00235 \pm 0,00634	7,5269
8. NIM	0,4625 \pm 0,0620	0,03105 \pm 0,01498	6,2964
9. CSIRO	1,3503 \pm 0,0078	0,06184 \pm 0,00153	4,4661
10. NPL	0,2744 \pm 0,0185	0,00196 \pm 0,00183	16,8950
11. NRC	- 2,2771 \pm 0,0336	0,05163 \pm 0,0059	10,8081
12. PTB	0,4217 \pm 0,0524	0,07000 \pm 0,00774	13,1517
13. VSL	0,4050 \pm 0,0454	0,03560 \pm 0,01158	7,3826

(*) Note: If $y = a' + bt$ with $\sigma_{a'}^2 = v_{11}$ and $\sigma_b^2 = v_{22}$, where v_{11} is the variance of a' , v_{22} is the variance of b , and v_{12} is the covariance of a' and b , then $y = a + b(t + t_0)$, where $a = a' - bt_0$, $t_0 = v_{12}/v_{22}$, $\sigma_a^2 = v_{11} - v_{12} t_0$, and the covariances of the transformed equation are zero (i.e., a and b are uncorrelated).

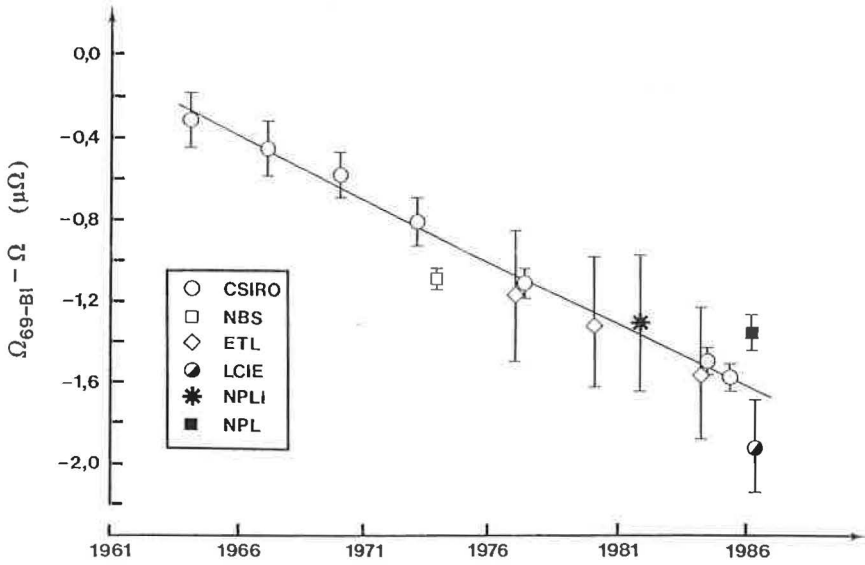


Fig. E3-3. — Drift of Ω_{69-B1} .

The least-squares fitted (solid) line is based on the CSIRO data only (see Table E3-4b, item 9).

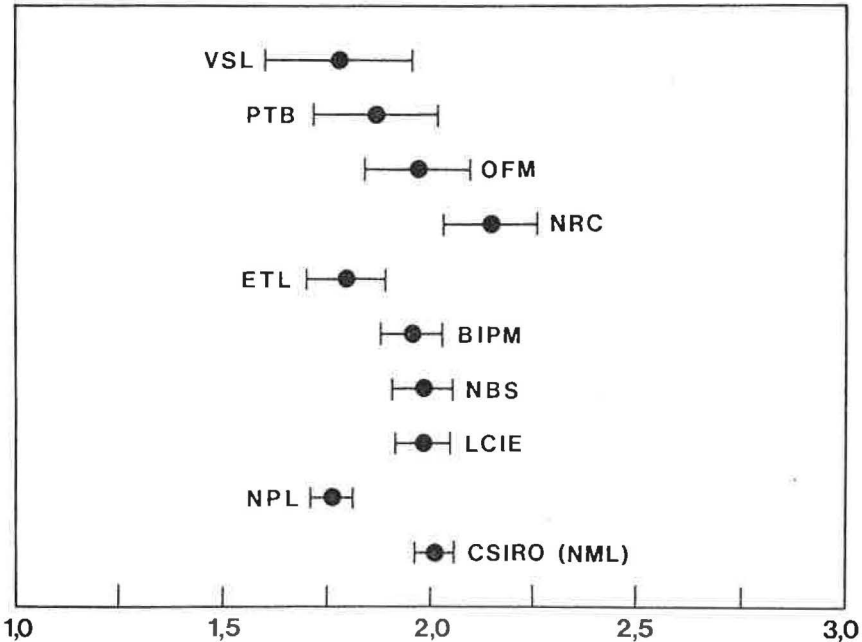


Fig. E3-4. — $[(R_{11} - 25\,812,8)/25\,812,8] \times 10^6$ in Ω_{69-B1} on 1986-01-01.

TABLE E3-5

Summary of present independent and non-independent values of R_H in SI units expressed as $R_H = 25\,812,8 (1 + \Delta \times 10^{-6} \pm \varepsilon \times 10^{-8}) \Omega$, also see Fig. E3-5.

Laboratory	Method (*)	Δ for R_H	Relative uncertainty ε
CSIRO ^a	A	0,383	7,8
ETL ^b	A	0,139	32,0
	B	0,169	33,0
LCIE ^c	A	0,070	22,0
	B	0,354	9,2
NPL ^d	A	0,411	6,7
	B	0,133	8,2
BIPM ^e	B,C	0,327	9,9
NBS ^f	B	0,354	9,8
	C	0,402	8,1
NRC ^g	B	0,521	13,1
	C	0,564	17,0
OFMET ^h	B	0,345	14,4
PTB ⁱ	B	0,255	17,1
VSL ^j	B	0,008	20,5

(*) Method A (QHE and ohm determinations).

(*) Method B (QHE, BIPM comparisons, and ohm determinations at the CSIRO).

(*) Method C (QHE, direct comparisons with the CSIRO, and ohm determinations at the CSIRO).

Note added in proof: For consistency with Table E3-1, the values of $\Omega_{LAB} - \Omega$ and $d\Omega_{LAB}/dt$ used to calculate Δ for methods B and C are those of Table E3-4a.

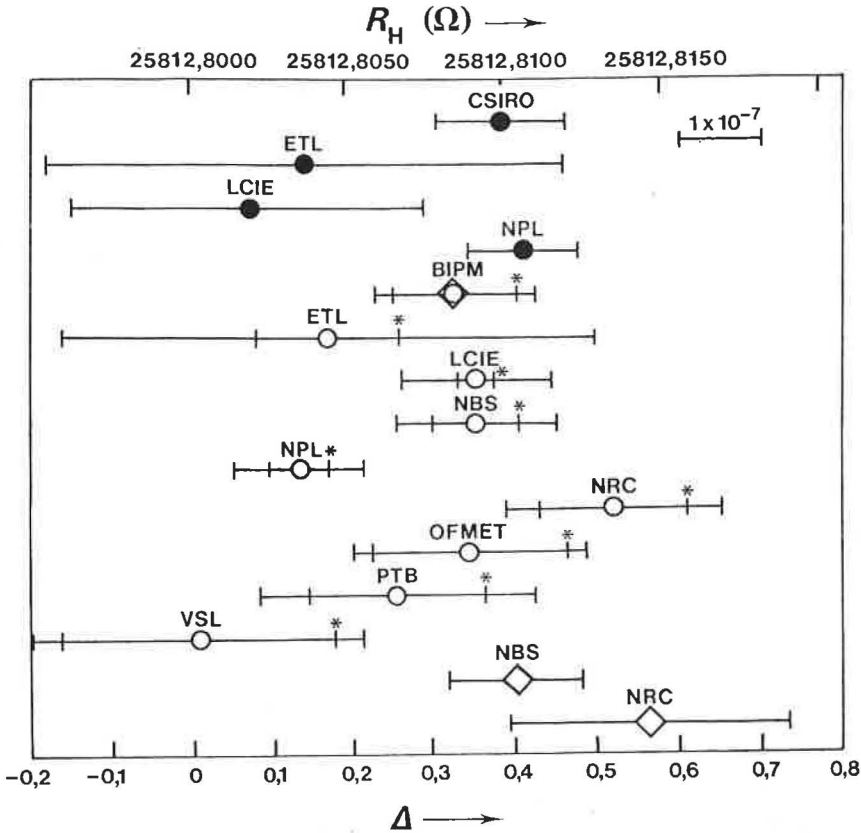


Fig. E3-5. — Summary of present independent and non-independent values of R_H in SI units expressed as $R_H = 25\,812,8 (1 + \Delta \times 10^{-6}) \Omega$. Also see Table E3-5.

● by method A (QHE and ohm determinations).

○ by method B (QHE, BIPM comparisons, and ohm determinations at the CSIRO).

◇ by method C (QHE, direct comparisons with the CSIRO, and ohm determinations at the CSIRO).

* small error bar represents uncertainty assigned to the determination of R_H in terms of Ω_{LAB} or, in the case of the ETL, in terms of 1Ω resistors.

TABLE E3-6

Independent values of $R_H = h/e^2 = \mu_0 c/(2\alpha)$ in SI units

$$(R_H = 25\,812,8\ \Omega [1 + \{\Delta \pm \varepsilon\} \times 10^{-6}])$$

	Δ	ε	Comments and references
1.	0,412	0,067	NPL, CCE/86-27, NPL calculable capacitor
2.	0,383	0,078	CSIRO, CCE/86-14, CSIRO calculable capacitor
3.	0,072	0,22	LCIE, CCE/86-15, LCIE calculable capacitor
4.	0,139	0,32	ETL, CCE/86-32 and CPEM 86, ETL calculable capacitor ^(a)
5.	0,160	0,090	NBS, CCE/86-18, NBS calculable capacitor (1973), $2e/h$, γ'_p , R_H
6.	0,219	0,16	1986 CODATA input: muonium hyperfine splitting ^(b)
7.	0,253	0,065	1986 CODATA input: α^{-1} (a_e) from theory and experiment (old value) ^(b)
8.	0,221	0,020	Most recent α^{-1} (a_e), Kinoshita, CPEM 86 (new value) ^(c)
9.	0,219	0,045	1986 CODATA recommended value for reference purposes (not independent of most of above values) ^(b)

^(a) Shida, K., Wada, T., Nishinaka, H., Kobayashi, M., Yonezaki, G., Igarashi, T. and Nemoto, T. Determination of quantized Hall resistance value by using calculable capacitor at the ETL. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-36**, June 1987, pp. 214-217.

^(b) Cohen, E. R. and Taylor, B. N. The 1986 adjustment of the fundamental physical constants. A report of the CODATA Task Group on Fundamental Constants. *CODATA Bulletin*, N° 63, Pergamon Press, Nov. 1986, 36 pages.

^(c) Kinoshita, T. The anomalous magnetic moment of the electron and the QED determination of the fine-structure constant. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-36**, June 1987, pp. 201-204.

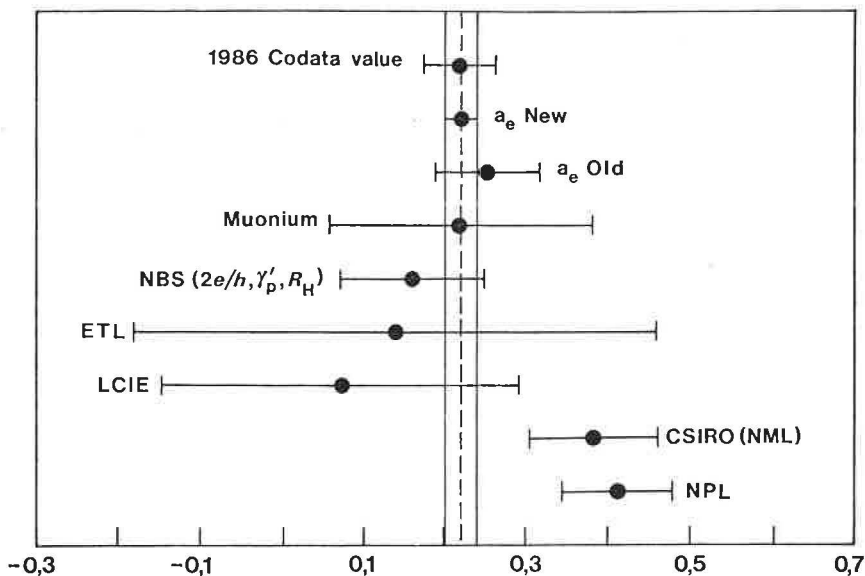


Fig. E3-6. — $[(R_H - 25\,812,8\ \Omega)/25\,812,8\ \Omega] \times 10^6$.

TABLE E3-7

Summary of future determinations of R_H and h/e^2 in SI units *

Source	Quantity and method	Expected approximate uncertainty in proportional parts $\times 10^6$	Date of availability
NBS	R_H , Direct, by calculable capacitor	0,04	1988-1989
	h/e^2 , Direct, by γ'_p	0,04	1988-1989
LCIE	R_H , Direct, by calculable capacitor	0,1	?
ETL	R_H , Direct, by calculable capacitor	?	« in several years » from 1986
Kinoshita, T.	h/e^2 , Indirect, by calculation	0,01	end 1987
PTB	R_H , Direct, by calculable capacitor	0,2	?

* Witt, T.J., Report on an informal meeting on values of $2e/h$ and R_H (unpublished).

TABLE E3-8

Differences between the as-maintained farad of various laboratories and that of NBS based on the results of the third international comparison of laboratory representations of the farad using the NBS 10 pF fused-silica travelling standards

(The uncertainty given is the standard deviation of the mean as obtained from the three travelling capacitors and thus is Type A only. The pooled standard deviation is 0,075 μF : see Fig. E3-8^(*))

	Laboratory	Measurement Date	$F_{\text{LAB}} - F_{\text{NBS}}$ (μF)
1.	CSIRO	1985-09-10	0,002 \pm 0,008
2.	VSL	1984-10-21	0,945 \pm 0,054
3.	NPL	1984-05-01	0,042 \pm 0,014
4.	PTB	1984-02-01	0,345 \pm 0,008
5.	ASMW	1983-10-26	0,205 \pm 0,037
6.	IEN	1982-08-14	0,034 \pm 0,017
7.	LCIE	1982-01-04	0,109 \pm 0,060
8.	NRC	1981-09-01	0,585 \pm 0,058
9.	NPRL	1980-12- ?	11,762 \pm 0,029
10.	VSL	1980-10-02	0,782 \pm 0,107
11.	NIM	1980-08-08	- 0,207 \pm 0,018
12.	PTB	1979-05-18	- 0,602 \pm 0,011
13.	NPL	1979-02-01	0,009 \pm 0,007

(*) From Document CCE/86-2. However, the result for CSIRO (item 1) was obtained from a direct transfer between NBS and CSIRO; it is not included in CCE/86-2 and is not officially a part of the third international comparison. Note that $F_{\text{CSIRO}} = F$ since mid-1960s; F_{NBS} was set equal to F in 1974; and $F_{\text{NPL}} = F$ since early 1980s.

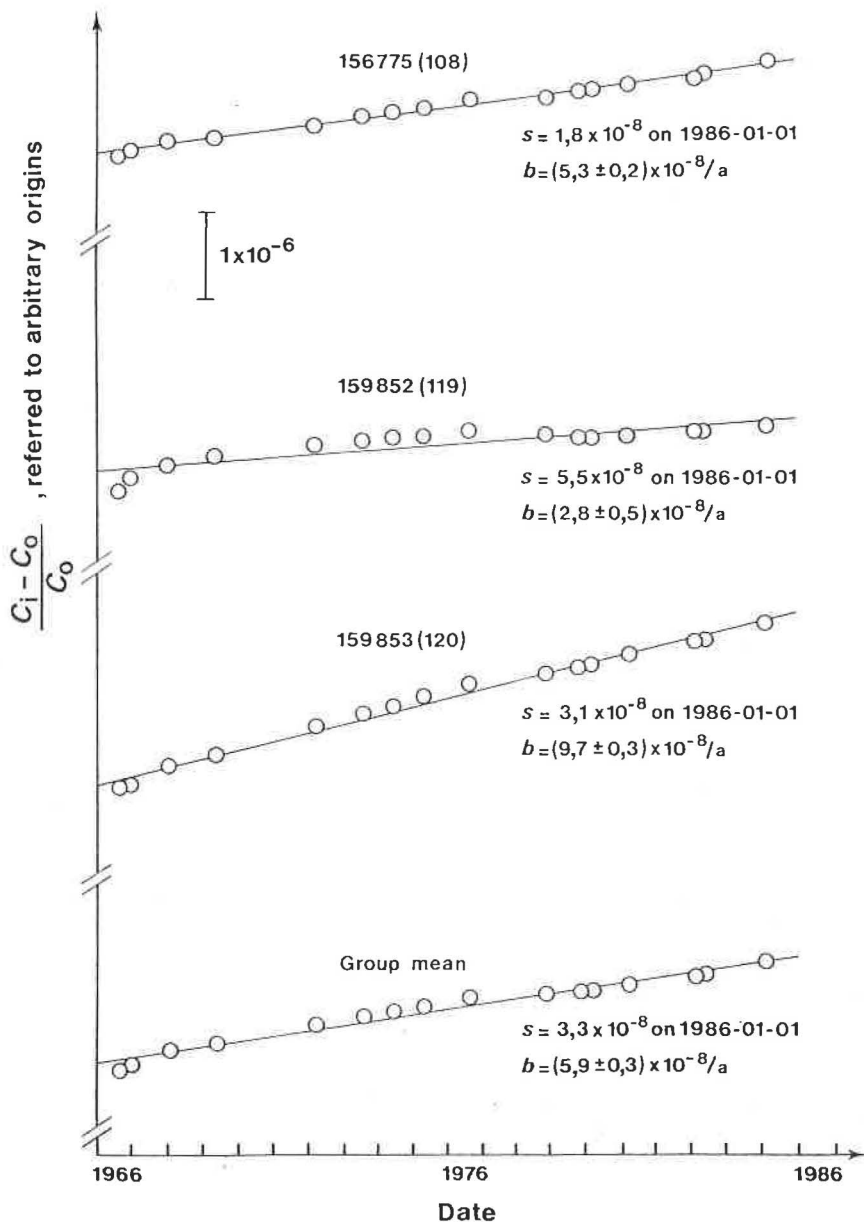


Fig. E3-7. — Deviations from the nominal value versus time for each 10 pF travelling standard and for the mean, based on measurements at the NBS. The straight lines result from least-squares fits. Estimated standard deviations from the fitted lines on 1986-01-01 and slopes, b , with their uncertainties, are also indicated. For convenience, each plot is referred to a separate arbitrary origin.

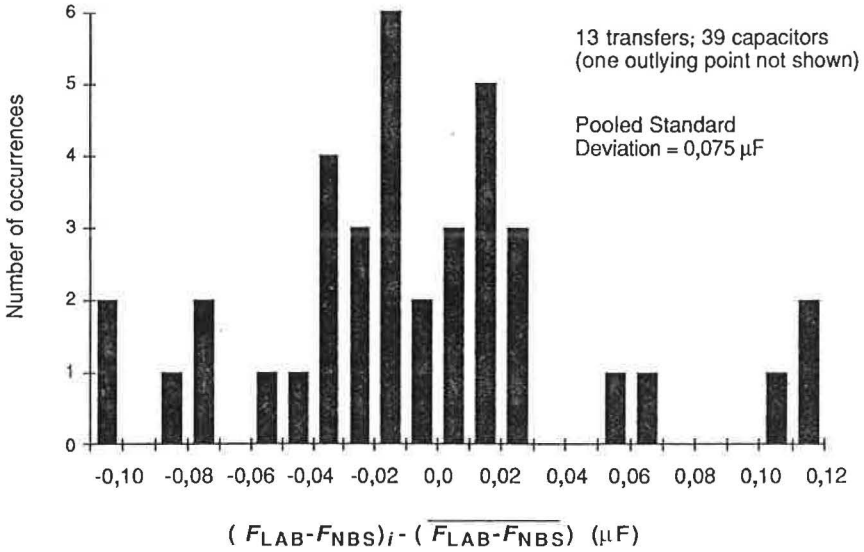


Fig. E3-8. — Dispersion of $F_{\text{LAB}} - F_{\text{NBS}}$ based mainly on the results of the third international comparison of laboratory representations of the farad using the NBS 10 pF fused-silica travelling standards.

APPENDIX E 4

Results of the third circular international comparison of 10 pF silica capacitance standards

by G. LECLERC

Bureau International des Poids et Mesures

(Translation of Document CCE/86-2)

This comparison was started in December 1978 and finished in March 1985. It consisted of four measurement circuits. The results of the first three were published in 1983⁽¹⁾ but we nevertheless repeat them in Tables I to III.

In the fourth and last circuit, the three travelling capacitors were calibrated successively at the NBS, the ASMW, the PTB, the NPL and the VSL and again at the NBS. The results are given in Table IV.

The temperature corresponding to the reference value of resistance specified by the NBS for the resistance thermometer fitted in each capacitor was not exactly 25,000 °C. Thus the results given for 25,000 °C by the NRC in September 1981 (Table III), by the ASMW in October 1983 (Table IV) and by the VSL in October 1984 (Table IV) are not directly comparable with the other results. To estimate the size of the correction to apply, in December 1984 we measured the resistances, at 25,000 °C, of the thermometers built into the travelling capacitors.

The results are the following :

Capacitor number	Resistance of the built-in thermometer at 25,000 °C	Resistance specified by the NBS
156 775 (108)	25,763 8 Ω ($s = 0,000\ 05\ \Omega$)	25,763 Ω
159 852 (119)	25,617 9 Ω ($s = 0,000\ 05\ \Omega$)	25,617 Ω
159 853 (120)	25,670 1 Ω ($s = 0,000\ 05\ \Omega$)	25,671 Ω

⁽¹⁾ *BIPM Com. Cons. Électricité*, **16**, 1983, Annexe E2, pp. E28-E32.

To calculate the corrections we used the coefficients of variation of capacity with thermometer resistance $\left(\frac{1}{C} \frac{\delta C}{\delta R}\right)$, furnished by the NBS.

Capacitor number	Correction
156 775 (108) : $106,0 \times 10^{-6} \Omega^{-1}$ (25,763 - 25,763 8) Ω	= - $0,08 \times 10^{-6}$
159 852 (119) : $108,6 \times 10^{-6} \Omega^{-1}$ (25,617 - 25,617 9) Ω	= - $0,10 \times 10^{-6}$
159 853 (120) : $102,2 \times 10^{-6} \Omega^{-1}$ (25,671 - 25,670 1) Ω	= + $0,09 \times 10^{-6}$
	mean = - $0,03 \times 10^{-6}$

The mean value of the correction to be applied to the final result is seen to be negligible with respect to the uncertainties of the representations of the farad maintained in the laboratories concerned.

It should be noted that, with respect to the representation of the farad maintained by the NBS, in the fourth circuit the variations in the travelling standards were greater than expected from their previous behaviour. Since the capacitance of each travelling standard is referred to a specified resistance of the built-in thermometer, it is possible that some of the observed variations are due to drifts in the thermometer resistances.

Finally, it should be noted that there are still relative differences of several parts in 10^7 among the representations of the farad in the various laboratories.

March 1986

TABLE I
Results of the third circular international comparison of 10 pF silica capacitance standards
 (first circuit)

$C = 10 (1 + \Delta \times 10^{-6}) \text{ pF}$
 Value of Δ (measured at approximately 25 °C) (1)

Standard N°	NBS		NPL		PTB		NBS	
	December 1, 1978 (100 V; 1592 Hz)	February 1, 1979	February 1, 1979	April 1, 1979	May 1-June 15, 1979 (75 V; 1592 Hz)	November 1, 1979 (100 V; 1592 Hz)	November 1, 1979 (100 V; 1592 Hz)	November 1, 1979 (100 V; 1592 Hz)
156 775 (108) :	- 14,08 ₆	- 14,07	- 14,07	- 13,99 (2)	- 13,46 (3)	- 14,02 ₂	- 14,02 ₂	- 14,02 ₂
159 852 (119) :	- 1,21 ₉	- 1,25	- 1,25	- 1,22	- 0,66	- 1,27 ₇	- 1,27 ₇	- 1,27 ₇
159 853 (120) :	- 0,24 ₈	- 0,25	- 0,25	- 0,17	+ 0,40	- 0,20 ₀	- 0,20 ₀	- 0,20 ₀
	- 5,18 ₄	- 5,19	- 5,19	- 5,13	- 4,57	- 5,16 ₆	- 5,16 ₆	- 5,16 ₆

(1) The temperature to which the results are referred is that corresponding to the reference resistance, specified by the NBS, of the thermometer built into the standard.

(2) As a result of a malfunction of a thermostat, the temperature of the standards fell to 10 °C for 48 hours on February 3 and 4, 1979.

(3) Uncertainty of the comparison with the reference standards : $s = 4 \times 10^{-8}$. Uncertainty of the representation of the farad maintained by the PTB: « random error » : $\pm 4 \times 10^{-7}$ ($P = 95\%$); residuals of « systematic errors » : $\pm 6 \times 10^{-7}$.

TABLE II
Results of the third circular international comparison of 10 pF silica capacitance standards
 (2nd circuit)

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

Value of Δ (measured at approximately 25 °C) ⁽¹⁾

Standard N°	NBS April 1, 1980 (100 V; 1592 Hz)	NIM August 7 and 8, 1980 (100 V; 1592 Hz)	VSL October 2, 1980 (100 V; 1592 Hz)	NPRL December 1980 (50 V; 1000 Hz)	NBS April 1, 1981 (100 V; 1592 Hz)
156 775 (108) :	- 14,00 ₀	- 13,74 ⁽²⁾	- 14,65 ⁽³⁾	- 25,7 ⁽⁴⁾	- 13,95 ₀
159 852 (119) :	- 1,28 ₄	- 1,08	- 1,95	- 13,0	- 1,26 ₄
159 853 (120) :	- 0,16 ₃	+ 0,06	- 1,10	- 11,9	- 0,04 ₇
	- 5,14 ₉	- 4,92	- 5,90	- 16,87	- 5,08 ₇

⁽¹⁾ The temperature to which the results are referred is that corresponding to the reference resistance, specified by the NBS, of the thermometer built into the standard.

⁽²⁾ NIM: reproducibility of the results : 4×10^{-6} ; uncertainty due essentially to the variable calculable capacitor : $s = 3,5 \times 10^{-7}$.

⁽³⁾ VSL: uncertainty of the comparison with the reference standards which maintain the farad at VSL : $s = 2 \times 10^{-6}$.

⁽⁴⁾ NPRL: uncertainty of the comparison with the reference standard which maintains the farad at NPRL : 2×10^{-7} (confidence level : 99,7 %).

Results of the third circular international comparison of 10 pF silica capacitance standards

(3rd circuit)

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

Value of Δ (measured at approximately 25 °C) (1)

Standard N°	NBS April 1, 1981 (100 V ; 1592 Hz)	NRC September 1, 1981 (100 V ; 1592 Hz)	LCIE January 4, 1982 (5 V ; 1592 Hz)	IEN August 14, 1982 (100 V ; 1592 Hz)	NBS March 1, 1983 (100 V ; 1592 Hz)
156 775 (108) :	- 13,95 ₀	- 14,44 ₁ (2)	- 13,96 ₀ (3)	- 13,91 ₁ (4)	- 13,89 ₀
159 852 (119) :	- 1,26 ₄	- 1,81 ₀	- 1,31 ₂	- 1,29 ₅	- 1,22 ₂
159 853 (120) :	- 0,04 ₇	- 0,71 ₂	- 0,21 ₈	+ 0,02 ₀	+ 0,09 ₈
	- 5,08 ₇	- 5,65 ₄	- 5,16 ₃	- 5,06 ₂	- 5,00 ₅

(1) The temperature to which the results are referred is that corresponding to the reference resistance, specified by the NBS, of the thermometer built into the standard, except for the results of the NRC which are referred to 25,000 °C.

(2) NRC : Uncertainty of the comparison of reference standards used to maintain the farad at NRC : $s = 1,3 \times 10^{-8}$.

(3) LCIE : probable error : 3×10^{-7} .

(4) IEN : Uncertainty of the comparison of reference standards used to maintain the farad at the IEN : $s = 2 \times 10^{-9}$ for standard N° 108 ; $s = 4 \times 10^{-9}$ for standard N° 119 and $s = 3 \times 10^{-9}$ for standard N° 120.

Values of Δ (measured at approximately 20 °C)

Standard N°	IEN August 11th, 1982
156 775 (108) :	- 66,23 ₀ (1)
159 852 (119) :	- 54,79
159 853 (120) :	- 50,82 ₀
	- 57,28 ₀

(1) Uncertainty of the comparison with the reference standards which maintain the farad at the IEN : $s = 2 \times 10^{-9}$ for standard N° 108 ; $s = 1,7 \times 10^{-8}$ for standard N° 119 ; (as already noted in 1975, this larger uncertainty is due to instability of capacitor N° 119 at 20 °C) ; and $s = 3 \times 10^{-9}$ for standard N° 120.

TABLE IV
Results of the third circular international comparison of 10 pF silica capacitance standards
 (4th circuit)

$$C = 10 (1 + 4 \times 10^{-6}) \text{ pF}$$

Value of Δ (measured at approximately 25 °C) (1)

Standard N°	NBS June 15, 1983 (100 V; 1592 Hz)	ASMW October 26, 1983 (70 V; 1592 Hz)	PTB February 1, 1984 (50 V; 1592 Hz)	NPL May 1, 1984 (100 V)	VSL October 21, 1984 (120 V; 1596 Hz)	NBS March 15, 1985 (100 V; 1592 Hz)
156 775 (108):	- 13,826	- 13,99 (2)	- 14,14 (3)	- 13,831 (4)	- 14,60 (5)	- 13,699
159 852 (119):	- 1,225	- 1,36	- 1,54	- 1,218	- 2,08	- 1,152
159 853 (120):	+ 0,125	- 0,11	- 0,14	+ 0,193	- 0,78	+ 0,314
Mean:	- 4,975	- 5,15	- 5,27	- 4,952	- 5,82	- 4,846

(1) The temperature to which the results are referred is that corresponding to the reference resistance, specified by the NBS, of the thermometer built into the standard, except for the results of the ASMW and the VSL which are referred to 25,000 °C.

(2) ASMW: Uncertainty in the comparison with the reference standards: $7,3 \times 10^{-8}$ ($P = 99\%$); uncertainty of the results expressed in farads: 5×10^{-7} ($P = 99\%$).

(3) PTB: Uncertainty in the comparison with the reference standards $s = 2 \times 10^{-8}$; uncertainty of the final results: $s = 2,5 \times 10^{-7}$ due to the uncertainty of the representation of the farad maintained by the PTB.

(4) NPL: Uncertainty in the comparison with the reference standards: $\pm 1,4 \times 10^{-8}$ for N° 156775; $\pm 1,3 \times 10^{-8}$ for N° 159852 and $\pm 1,7 \times 10^{-8}$ for N° 159853.

(5) VSL: Type A uncertainty: $s = 2 \times 10^{-8}$; type B uncertainty: $s = 5 \times 10^{-7}$; combined uncertainty: $s = 1 \times 10^{-6}$.

APPENDIX E 5

Report on the fourteenth intercomparison of national standards of electrical resistance (*)

(November 1983, February 1984 and March 1985)

by G. LECLERC

Bureau International des Poids et Mesures

(Translation of document CCE/86-1)

This comparison was organized by the Comité Consultatif d'Électricité (CCE) in its 16th session in March 1983. Because thirteen laboratory-members of the CCE decided to participate, it was decided that a single simultaneous comparison of all transfer standards would take too much time. We thus proposed to the laboratories to divide the comparison into two sessions of about six weeks duration, the six reference standards of the BIPM participating in each session.

After consultation with the laboratories, two groups were established. These were the following :

Group A : NPRL (Pretoria), ASMW (Berlin), PTB (Braunschweig), NRC (Ottawa), LCIE (Fontenay-aux-Roses), IEN (Turin) and IMM (Leningrad).

These seven laboratories sent to the BIPM 19 one-ohm travelling standards. These were compared among themselves and to the BIPM standards according to a design which required 124 sets of measurements arranged symmetrically in time into two groups of 62 sets, the second

(*) This new (March 1986) version combines the results of the report BIPM-85/9 (September 1985) and its addendum (November 1985) and takes into account comments made by some of the laboratories.

In addition, the latest revisions presented by the CSIRO of the relationship between $\Omega_{69 \text{ BI}}$ and Ω_{CSIRO} have been included in the revised addendum.

group repeating the measurements of the first and timed such that the mean date for every set and its repetition was the central date of the comparison. This comparison began November 3rd, 1983 and ended December 20th, 1983.

Group B: CSIRO (Lindfield), NIM (Beijing), NBS (Gaithersburg), ETL (Ibaraki), VSL (Delft) and NPL (Teddington).

These six laboratories sent to the BIPM 17 one-ohm travelling standards which were compared among themselves and to the BIPM standards in a design requiring 132 sets also arranged symmetrically in time, as described above, except in this case in two groups of 66 sets. The starting date was January 20th, 1984, the finishing date was March 5, 1984 and the mean date was February 12th, 1984.

All of the transfer standards were of the highest metrological quality, of the sealed type and fitted with four terminals. They were kept in thermoregulated baths of oil at 20 °C for the whole time they remained at the BIPM.

The comparisons were carried out, using a Thomson double bridge having 1 000 Ω arms, by a substitution method in which the two standards to be compared in a measurement set were compared, one at a time, to a variable tare resistor. In the middle of each set the arms « measurement » and « tare » were interchanged. During the observations the standards carried a measuring current of 0,1 A. Their temperatures were measured with a platinum resistance thermometer.

The resistances, at 0 °C, of the two thermometers as well as the value of the tare were determined before the beginning of the comparison of Group A, in the intervening time between the Group A and Group B comparisons and again just at the end of the Group B measurements. The thermometer bridges were calibrated in October and at the end of December, 1983. In each comparison the variable shunt resistance box used to obtain the principal bridge balance was different for the measurement sets of the « repeat » half-cycle from the box used in the sets of the half-cycle preceding the central date.

Two observers each carried out two sets of measurements per day. The daily measurements were also symmetric with respect to the central date. The « repeat » measurements were always carried out by the observer who did not carry out the corresponding measurements of the first half-cycle.

The six BIPM standards, the mean resistance of which comprises Ω_{69-BI} (BIPM's representation of the ohm), were compared in a pairwise manner before the first comparison (17-21 October, 1983), in the period between the two comparisons (30 December 1983 — 6 January 1984) and after the second comparison (15-21 March, 1984).

Data analysis

The comparison data were analyzed by the least-squares method. The sum of the values of the BIPM's six reference standards was used to deduce the value of each travelling standard in terms of Ω_{69-BI} at 20,000 °C, at a power dissipation of 0,01 W over the time required to observe the bridge balance and at 101 325 Pa for the standards for which the pressure coefficients were known. The results for Group A (central date: November 26, 1983) are given in Table A1: and those for Group B (central date: February 12, 1984) appear in Table B1.

The calculations yielding the relations among Ω_{69-BI} and the representations of the ohm for each laboratory are given in Tables A2 and A3 for the laboratories in Group A and Tables B2 and B3 for those of Group B.

Shifts were observed in the values of the two transfer standards from the CSIRO belonging to Group B. These presumably arose sometime in the round-trip shipment of the standards from Sydney to Paris via London. The results obtained with these two resistors were considered unreliable and the CSIRO decided not to accept them. Instead they carried out a second comparison of Ω_{CSIRO} with Ω_{69-BI} . For this reason we do not list the results of CSIRO in Tables B2 and B3.

New comparison of Ω_{CSIRO} with Ω_{69-BI}

The four standards from the CSIRO which took part in this new comparison arrived by direct flight from Sydney to Paris and were received by the BIPM on March 2, 1985. They were returned by direct flight on April 7, 1985.

Using the same method as in 1983 and 1984, with the same measuring system and under the same conditions, two observers carried out pairwise comparisons of the four standards of the CSIRO among themselves as well as comparisons of each of the four transfer standards to the six BIPM reference standards. The sets of measurements were repeated symmetrically in time, as described above, about the central date of March 24, 1985. The six standards of the BIPM were compared among themselves, two-by-two, before the comparison with the CSIRO and in April 1985 after the comparison. The results were treated by the method of least squares and are referred to 20,000 °C and 101 325 Pa on the central date. The values of the transfer standards of the CSIRO are expressed in terms of Ω_{69-BI} in Table C1.

The calculations relating Ω_{CSIRO} to Ω_{69-BI} are given in Tables C2 and C3.

Supplementary comparison of Ω_{NPL} to $\Omega_{69\text{-BI}}$

This comparison was undertaken upon the occasion of the transit via the BIPM of two $1\ \Omega$ standards from CSIRO to NPL.

The two standards were compared between themselves and to the six BIPM reference standards in January 1984, immediately before the beginning of the Group B comparison, and in March 1984, just after the completion of the Group B comparison. In terms of $\Omega_{69\text{-BI}}$, the following values were obtained, referred to $20,000\ ^\circ\text{C}$ for mid-February 1984, the approximate mean date of the two determinations.

$$\begin{aligned} \text{standard S-60652} &: 1,000\ 054\ 15\ \Omega_{69\text{-BI}} \\ \text{S-60656} &: 1,000\ 011\ 80\ \Omega_{69\text{-BI}} \end{aligned}$$

These two standards were transported to NPL along with the NPL's transfer standards. Their values at $20,000\ ^\circ\text{C}$ in Ω_{NPL} for the central date, March 29, 1984, were :

$$\begin{aligned} \text{standard S-60652} &: 1,000\ 053\ 77\ \Omega_{\text{NPL}} \\ \text{S-60656} &: 1,000\ 011\ 43\ \Omega_{\text{NPL}} \end{aligned}$$

These data lead to the following results for February-March 1984 :

$$\begin{aligned} \text{with S-60652} & \quad \Omega_{\text{NPL}} = \Omega_{69\text{-BI}} + 0,38\ \mu\Omega \\ \text{S-60656} & \quad \Omega_{\text{NPL}} = \Omega_{69\text{-BI}} + 0,37\ \mu\Omega \\ \text{for the mean} & \quad \Omega_{\text{NPL}} = \Omega_{69\text{-BI}} + 0,37\ \mu\Omega \end{aligned}$$

Although this comparison was incomplete in the metrological sense because two standards, S-60652 and S-60656, were not remeasured at the BIPM after the NPL measurements, the NPL requested that these results be included as part of the 14th international comparison. The final result for NPL was thus calculated as the weighted mean of the results of each of the three transfer standards of the Group B comparison (each given a weight of two) and the results obtained from S-60652 and S-60656 (each given a weight of one). This gave :

$$\Omega_{\text{NPL}} = \Omega_{69\text{-BI}} + 0,32\ \mu\Omega.$$

Final results of the 14th comparison of national standards of resistance

These results are given in Tables A4, B4 and C4.

*List of standard resistors participating
in the 14th comparison*

Laboratory	Standard	Arrival at BIPM	Departure from BIPM	Mode of transport
<i>Group A :</i>				
NPRL	1 132 427	1983-09-29	1984-02-29	air,
(South Africa)	1 146 606			accompanied
ASMW	501	1983-10-16	1984-03-09	air,
(Dem. Rep. of Germany)	508 D-3			accompanied
PTB	1 692 273	1983-10-14	1984-01-18	automobile,
(Fed. Rep. of Germany)	1 730 950 1 730 951			accompanied
NRC	1 336 435	1983-11-02	1984-01-11	air,
(Canada)	1 336 436 32 249			freight
LCIE	1 732 525	1983-10-28	1984-01-17	automobile,
(France)	1 732 530 1 732 532			accompanied
IEN	1 681 955	1983-10-26	1984-01-17	automobile,
(Italy)	1 681 957 1 723 160			accompanied
IMM	710	1983-10-15	1984-04-06	air,
(USSR)	922			accompanied
<i>Group B :</i>				
CSIRO	S-60655	1983-12-14	1984-03-14	air,
(Australia)	S-60657			freight
NIM	127BZ13	1984-01-11	1984-03-12	air,
(People's Rep. of China)	201BZ13 303BZ13			accompanied
NBS	77	1983-12-01	1984-03-02	air,
(USA)	1 018 1 020			accompanied
ETL	8C13	1984-01-10	1984-03-15	air,
(Japan)	70C111 72C202			freight
VSL	1 753 639	1983-12-05	1984-04-18	automobile,
(The Netherlands)	1 753 641 1 756 653			accompanied
NPL	713	1984-01-09	1984-03-16	air,
(United Kingdom)	221 921 221 928			accompanied
<i>Supplementary standards</i>				
CSIRO	S-60650	1985-03-02	1985-04-07	air,
(Australia)	S-60651 S-60655 S-60657			freight

TABLE A1

*Resistance of the travelling standards, at 20,000 °C,
expressed in Ω_{69-81} (the BIPM's representation of the ohm)
on November 26, 1983, the central date of the comparison*

Laboratory	Standard	Resistance	Uncertainty (s)
NPRL	1 132 427	0,999 992 57 Ω_{69-81}	0,011 $\mu\Omega$
	1 146 606	0,999 991 90	0,011
ASMW	501	1,000 015 02 Ω_{69-81}	0,013 $\mu\Omega$
	508	0,999 992 39	0,013
	D-3	1,000 041 68	0,012
PTB	1 692 273	0,999 980 81 Ω_{69-81}	0,012 $\mu\Omega$
	1 730 950	0,999 976 83	0,012
	1 730 951	0,999 975 24	0,012
NRC	32 249	1,000 029 72 Ω_{69-81}	0,012 $\mu\Omega$
	1 336 435	0,999 995 00	0,012
	1 336 436	0,999 992 97	0,013
LCIE	1 732 525	0,999 978 22 Ω_{69-81}	0,013 $\mu\Omega$
	1 732 530	0,999 978 06	0,012
	1 732 532	0,999 978 41	0,012
IEN	1 681 955	0,999 976 85 Ω_{69-81}	0,012 $\mu\Omega$
	1 681 957	0,999 974 77	0,012
	1 723 160	0,999 979 34	0,012
IMM	710	0,999 996 79 Ω_{69-81}	0,011 $\mu\Omega$
	922	1,000 014 40	0,011

TABLE A2

Resistance of travelling standards, at 20,000 °C, expressed in terms of the representation of the ohm maintained by their laboratory of origin, for the date November 26, 1983*

The resistance on November 26, 1983, the central date of the comparison, was calculated by linear interpolation of the resistances attributed to the travelling standards by the national laboratories before and after the measurements at the BIPM.

NPRL

Standard	1983-09-01	1984-03-23	1983-11-26
1 132 427	0,999 992 6	0,999 992 65	0,999 992 62 Ω_{NPRL}
1 146 606	0,999 991 8	0,999 991 75	0,999 991 78
	<u>0,999 992 20</u>	<u>0,999 992 20</u>	<u>0,999 992 20</u> Ω_{NPRL}

Values measured at a pressure of 88 180 Pa.

ASMW

	1983-10-11	1984-03-19	
501	1,000 014 9	1,000 014 9	1,000 014 90 Ω_{ASMW}
508	0,999 992 3	0,999 992 2	0,999 992 27
D-3	1,000 041 8	1,000 041 6	1,000 041 74
	<u>1,000 016 33</u>	<u>1,000 016 23</u>	<u>1,000 016 30</u> Ω_{ASMW}

PTB

	1983-10-01	1984-02-01	
1 692 273	0,999 979 729	0,999 979 768	0,999 979 747 Ω_{PTB}
1 730 950	0,999 975 751	0,999 975 798	0,999 975 772
1 730 951	0,999 974 117	0,999 974 222	0,999 974 165
	<u>0,999 976 532</u>	<u>0,999 976 596</u>	<u>0,999 976 561</u> Ω_{PTB}

Measurements carried out at a current of 0,042 A.

NRC

	1983-10-22	1984-01-24	
32 249	1,000 031 27	1,000 031 64	1,000 031 41 Ω_{NRC}
1 336 435	0,999 996 89	0,999 996 83	0,999 996 87
1 336 436	0,999 994 84	0,999 994 79	0,999 994 82
	<u>1,000 007 67</u>	<u>1,000 007 75</u>	<u>1,000 007 70</u> Ω_{NRC}

Measurements carried out at a current of 0,05 A.

* Unless otherwise indicated, the resistance was measured at a pressure near 101 325 Pa and with a current of 0,1 A.

LCIE

Standard	1983-10-21	1984-02-03	1983-11-26
1 732 525	0,999 977 30	0,999 977 30	0,999 977 30 Ω_{LCIE}
1 732 530	0,999 977 12	0,999 977 13	0,999 977 12
1 732 532	0,999 977 47	0,999 977 47	0,999 977 47
	<u>0,999 977 30</u>	<u>0,999 977 30</u>	<u>0,999 977 30 Ω_{LCIE}</u>

Measurements carried out at a current of 0,04 A.

IEN

	1983-10-10	1984-02-01	
1 681 955	0,999 975 42	0,999 975 36	0,999 975 40 Ω_{IEN}
1 681 957	0,999 973 40	0,999 973 33	0,999 973 37
1 723 160	0,999 977 84	0,999 977 85	0,999 977 84
	<u>0,999 975 55</u>	<u>0,999 975 51</u>	<u>0,999 975 53 Ω_{IEN}</u>

IMM

	1983-10-06	1984-04-19	
710	0,999 995 38	0,999 995 20	0,999 995 33 Ω_{IMM}
922	1,000 012 99	1,000 012 85	1,000 012 95
	<u>1,000 004 18₅</u>	<u>1,000 004 02₅</u>	<u>1,000 004 14 Ω_{IMM}</u>

TABLE A3

Value of the representation of the ohm maintained by each laboratory
in Ω_{69-BI} , the representation of the ohm maintained by the BIPM,
on November 26, 1983

NPRL

Standard

1 132 427	0,999 992 77	Ω_{NPRL}	=	0,999 992 57	Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{NPRL} = \Omega_{69-BI} - 0,20 \mu\Omega$
1 146 606	0,999 991 93		=	0,999 991 90			= -0,03
	0,999 992 35	Ω_{NPRL}	=	0,999 992 23	Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{NPRL} = \Omega_{69-BI} - 0,12 \mu\Omega$

The values of the NPRL given in Table A2 were corrected to a pressure of 101 325 Pa.

ASMW

501	1,000 014 90	Ω_{ASMW}	=	1,000 015 02	Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{ASMW} = \Omega_{69-BI} + 0,12 \mu\Omega$
508	0,999 992 27		=	0,999 992 39			= +0,12
D-3	1,000 041 74		=	1,000 041 68			= -0,06
	1,000 016 30	Ω_{ASMW}	=	1,000 016 36	Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{ASMW} = \Omega_{69-BI} + 0,06 \mu\Omega$

PTB

1 692 273	0,999 979 747	Ω_{PTB}	=	0,999 980 811	Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{PTB} = \Omega_{69-BI} + 1,06_4 \mu\Omega$
1 730 950	0,999 975 772		=	0,999 976 831			= +1,05 ₉
1 730 951	0,999 974 165		=	0,999 975 236			= +1,07 ₁
	0,999 976 561	Ω_{PTB}	=	0,999 977 626	Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{PTB} = \Omega_{69-BI} + 1,06_5 \mu\Omega$

NRC

1 336 435	0,999 996 87	Ω_{NRC}	=	0,999 995 00		or	$\Omega_{NRC} = \Omega_{69-BI} - 1,87_4 \mu\Omega$
1 336 436	0,999 994 82		=	0,999 992 97			= -1,85
	0,999 995 84 ₅	Ω_{NRC}	=	0,999 993 98 ₅	Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{NRC} = \Omega_{69-BI} - 1,86 \mu\Omega$

Standard number 32249 underwent an abnormal change in transport and was eliminated at the request of the NRC.

LCIE

1 732 525	0,999 977 30	Ω_{LCIE}	=	0,999 978 22	Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{LCIE} = \Omega_{69-BI} + 0,92 \mu\Omega$
1 732 530	0,999 977 12		=	0,999 978 06			= +0,94
1 732 532	0,999 977 47		=	0,999 978 41			= +0,94
	0,999 977 30	Ω_{LCIE}	=	0,999 978 23	Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{LCIE} = \Omega_{69-BI} + 0,93 \mu\Omega$

IEN

1 681 955	0,999 975 40	Ω_{IEN}	=	0,999 976 85	Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{IEN} = \Omega_{69-BI} + 1,45 \mu\Omega$
1 681 957	0,999 973 37		=	0,999 974 77			= +1,40
1 723 160	0,999 977 84		=	0,999 979 34			= +1,50
	0,999 975 53	Ω_{IEN}	=	0,999 976 98	Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{IEN} = \Omega_{69-BI} + 1,45 \mu\Omega$

IMM

710	0,999 995 33	Ω_{IMM}	=	0,999 996 79	Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{IMM} = \Omega_{69-BI} + 1,46 \mu\Omega$
922	1,000 012 95		=	1,000 014 40			= +1,45
	1,000 004 14	Ω_{IMM}	=	1,000 005 59	Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{IMM} = \Omega_{69-BI} + 1,45 \mu\Omega$

TABLE B1

*Resistance of travelling standards, at 20,000 °C, expressed in Ω_{69-B1}
 (the BIPM's representation of the ohm)
 on February 12, 1984, the central date of the comparison*

Laboratory	Standard	Resistance	Uncertainty (s)
CSIRO	S-60 655	0,999 997 97 Ω_{69-B1}	0,008 $\mu\Omega$
	S-60 657	1,000 000 75	0,008
NIM	127 BZ 13	0,999 989 22 Ω_{69-B1}	0,010 $\mu\Omega$
	201 BZ 13	0,999 987 38	0,010
	303 BZ 13	1,000 002 79	0,012
NBS	77	1,000 006 11 Ω_{69-B1}	0,008 $\mu\Omega$
	1018	0,999 974 32	0,009
	1020	0,999 974 16	0,008
ETL	8C13	0,999 994 20 Ω_{69-B1}	0,009 $\mu\Omega$
	70C111	1,000 002 33	0,009
	72C202	0,999 999 30	0,010
VSL	1 753 639	0,999 977 28 Ω_{69-B1}	0,010 $\mu\Omega$
	1 753 641	0,999 977 31	0,010
	1 756 653	0,999 978 72	0,011
NPL	713	1,000 049 34 Ω_{69-B1}	0,010 $\mu\Omega$
	221 921	1,000 007 66	0,009
	221 928	0,999 999 95	0,009

TABLE B2

Resistance of travelling standards, at 20,000 °C,
expressed in terms of the representation of the ohm maintained
by their laboratory of origin, for the date February 12, 1984*

The resistance on February 12, 1984, the central date of the comparison, was calculated by linear interpolation of the resistances attributed to the travelling standards by the national laboratories before and after the measurements at the BIPM.

Standard	NIM		
	1983-12-07	1984-03-22	1984-02-12
127BZ13	0,999 988 77	0,999 988 76	0,999 988 76 Ω_{NIM}
201BZ13	0,999 986 82	0,999 986 80	0,999 986 81
303BZ13	<u>1,000 002 34</u>	<u>1,000 002 30</u>	<u>1,000 002 31</u>
	0,999 992 64	0,999 992 62	0,999 992 63 Ω_{NIM}

	NBS	
77		1,000 005 90 ₅ Ω_{NBS}
1018		0,999 974 15 ₄
1020		<u>0,999 973 96₇</u>
		0,999 984 67 ₅ Ω_{NBS}

The resistance of each standard on February 12, 1984 was calculated by the NBS with a linear regression formula deduced from 94 measurements, 61 of which were carried out between September 2 and November 28, 1983 (before shipping the standards to the BIPM) and 33 of which were carried out between March 3 and May 2, 1984 (after their return to Gaithersburg).

	ETL		
	1983-11-15	1984-05-10	
8C13	0,999 992 78	0,999 992 56	0,999 992 67 Ω_{ETL}
70C111	1,000 000 88	1,000 000 66	1,000 000 77
72C202	<u>0,999 997 79</u>	<u>0,999 997 62</u>	<u>0,999 997 70</u>
	0,999 997 15	0,999 996 95	0,999 997 05 Ω_{ETL}

	VSL		
	1983-11-17	1984-06-22	
1 753 639	0,999 976 78	0,999 976 71	0,999 976 75 Ω_{VSL}
1 753 641	0,999 976 69	0,999 976 77	0,999 976 72
1 756 653	<u>0,999 978 18</u>	<u>0,999 978 14</u>	<u>0,999 978 16</u>
	0,999 977 22	0,999 977 21	0,999 977 21 Ω_{VSL}

	NPL		
	1984-01-05	1984-03-29	
713	1,000 048 95	1,000 048 97	1,000 048 96 Ω_{NPL}
221 921	1,000 007 34	1,000 007 41	1,000 007 37
221 928	<u>0,999 999 70</u>	<u>0,999 999 74</u>	<u>0,999 999 72</u>
	1,000 018 66	1,000 018 71	1,000 018 68 Ω_{NPL}

* This resistance was measured at a pressure near 101 325 Pa and with a current of 0,1 A.

TABLE B3

Value of the representation of the ohm maintained by each laboratory in Ω_{69-BI} , the representation maintained by the BIPM, on February 12, 1984

NIM				
Standard				
127BZ13	0,999 988 76 Ω_{NIM}	= 0,999 989 22 Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{NIM} = \Omega_{69-BI} + 0,46 \mu\Omega$
201BZ13	0,999 986 81	= 0,999 987 38		= + 0,57
303BZ13	1,000 002 31	= 1,000 002 79		= + 0,48
	<hr/>	<hr/>		<hr/>
	0,999 992 63 Ω_{NIM}	= 0,999 993 13 Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{NIM} = \Omega_{69-BI} + 0,50 \mu\Omega$
NBS				
77	1,000 005 91 Ω_{NBS}	= 1,000 006 11 Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{NBS} = \Omega_{69-BI} + 0,20 \mu\Omega$
1018	0,999 974 15	= 0,999 974 32		= + 0,17
1020	0,999 973 97	= 0,999 974 16		= + 0,19
	<hr/>	<hr/>		<hr/>
	0,999 984 68 Ω_{NBS}	= 0,999 984 86 Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{NBS} = \Omega_{69-BI} + 0,19 \mu\Omega$
ETL				
8C13	0,999 992 67 Ω_{ETL}	= 0,999 994 20 Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{ETL} = \Omega_{69-BI} + 1,53 \mu\Omega$
70C111	1,000 000 77	= 1,000 002 33		= + 1,56
72C202	0,999 997 70	= 0,999 999 30		= + 1,60
	<hr/>	<hr/>		<hr/>
	0,999 997 05 Ω_{ETL}	= 0,999 998 61 Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{ETL} = \Omega_{69-BI} + 1,56 \mu\Omega$
VSL				
1 753 639	0,999 976 75 Ω_{VSL}	= 0,999 977 28 Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{VSL} = \Omega_{69-BI} + 0,53 \mu\Omega$
1 753 641	0,999 976 72	= 0,999 977 31		= + 0,59
1 756 653	0,999 978 16	= 0,999 978 72		= + 0,56
	<hr/>	<hr/>		<hr/>
	0,999 977 21 Ω_{VSL}	= 0,999 977 77 Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{VSL} = \Omega_{69-BI} + 0,56 \mu\Omega$
NPL				
713	1,000 048 96 Ω_{NPL}	= 1,000 049 34 Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{NPL} = \Omega_{69-BI} + 0,38 \mu\Omega$
221 921	1,000 007 37	= 1,000 007 66		= + 0,29
221 928	0,999 999 72	= 0,999 999 95		= + 0,23
	<hr/>	<hr/>		<hr/>
	1,000 018 68 Ω_{NPL}	= 1,000 018 98 Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{NPL} = \Omega_{69-BI} + 0,30 \mu\Omega$
Auxiliary comparison				
S-60652	1,000 053 77 Ω_{NPL}	= 1,000 054 15 Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{NPL} = \Omega_{69-BI} + 0,38 \mu\Omega$
S-60656	1,000 011 43	= 1,000 011 80	or	= + 0,37
	<hr/>	<hr/>		<hr/>
	1,000 032 60 Ω_{NPL}	= 1,000 032 97 Ω_{69-BI}	or	$\Omega_{NPL} = \Omega_{69-BI} + 0,37 \mu\Omega$

Weighted mean (see p. E 146) : $\Omega_{NPL} = \Omega_{69-BI} + 0,32 \mu\Omega$

TABLE C1

Resistance of the travelling standards from the CSIRO, at 20,000 °C, expressed in Ω_{69-B1} (the BIPM's representation of the ohm), on March 24, 1985, the central date of the comparison

Standard	Resistance	Uncertainty (s)
S-60650	1,000 033 18 ₃ Ω_{69-B1}	0,006 $\mu\Omega$
S-60651	1,000 025 72 ₇	0,006
S-60655	0,999 998 01 ₀	0,006
S-60657	1,000 000 55 ₈	0,006

TABLE C2

Resistance of the travelling standards from the CSIRO, at 20,000 °C, expressed in Ω_{CSIRO} (the CSIRO's representation of the ohm) on March 24, 1985

The mean resistances, communicated by the CSIRO, result from an interpolation to March 24, 1985 of resistances determined *before* transport of the standards to the BIPM and *after* their return.

Standard	Resistance before transport	Resistance after transport	Mean resistance
S-60650	1,000 031 69	1,000 031 69	1,000 031 69 Ω_{CSIRO}
S-60651	1,000 024 27	1,000 024 25	1,000 024 26
S-60655	0,999 996 51	0,999 996 48	0,999 996 49 ₅
S-60657	0,999 999 08	0,999 999 09	0,999 999 08 ₅
	1,000 012 89	1,000 012 88	1,000 012 88 Ω_{CSIRO}

TABLE C3

Value of the representation of the ohm maintained by the CSIRO in terms of Ω_{69-B1} , the representation maintained by the BIPM, on March 24, 1985

S-60650	1,000 031 69 Ω_{CSIRO}	=	1,000 033 18 ₃ Ω_{69-B1}	or	$\Omega_{CSIRO} = \Omega_{69-B1} + 1,49_2 \mu\Omega$
S-60651	1,000 024 26	=	1,000 025 72 ₇	=	+ 1,46 ₆
S-60655	0,999 996 49 ₅	=	0,999 998 01 ₀	=	+ 1,51 ₅
S-60657	0,999 999 08 ₅	=	1,000 000 55 ₈	=	+ 1,47 ₃
	1,000 012 88 Ω_{CSIRO}	=	1,000 014 37 Ω_{69-B1}	or	$\Omega_{CSIRO} = \Omega_{69-B1} + 1,49 \mu\Omega$

**Results of the 14th comparison
of national standards of resistance**

TABLE A4

		on 1983-11-26
South Africa (NPRL)	Ω_{NPRL}	$= \Omega_{69\text{-BI}} - 0,12 \mu\Omega$
Dem. Rep. of Germany (ASMW)	Ω_{ASMW}	$= + 0,06$
Fed. Rep. of Germany (PTB)	Ω_{PTB}	$= + 1,06$
Canada (NRC)	Ω_{NRC}	$= - 1,86$
France (LCIE)	Ω_{LCIE}	$= + 0,93$
Italy (IEN)	Ω_{IEN}	$= + 1,45$
USSR (IMM)	Ω_{IMM}	$= + 1,45$

TABLE B4

		on 1984-02-12
People's Rep. of China (NIM)	Ω_{NIM}	$= \Omega_{69\text{-BI}} + 0,50 \mu\Omega$
USA (NBS)	Ω_{NBS}	$= + 0,19$
Japan (ETL)	Ω_{ETL}	$= + 1,56$
The Netherlands (VSL)	Ω_{VSL}	$= + 0,56$
United Kingdom (NPL)	Ω_{NPL}	$= + 0,32$

TABLE C4

		on 1985-03-24
Australia (CSIRO)	Ω_{CSIRO}	$= \Omega_{69\text{-BI}} + 1,49 \mu\Omega$

with

$$\Omega_{69\text{-BI}} \text{ (on 1984-02-12)} - \Omega_{69\text{-BI}} \text{ (on 1983-11-26)} = - 0,012 \mu\Omega *$$

$$\text{and } \Omega_{69\text{-BI}} \text{ (on 1985-03-24)} - \Omega_{69\text{-BI}} \text{ (on 1983-11-26)} = - 0,075 \mu\Omega.$$

* These differences were calculated using a drift rate for $\Omega_{69\text{-BI}}$ of $- 0,056 6 \mu\Omega$ per year.

Uncertainties

1. — Uncertainties in the values of the travelling standards in terms of Ω_{69-B1} (i.e., results of the measurements at the BIPM)

— Type A uncertainties (see Tables A1, B1 and C1):
 maximum standard deviation for the resistance of one standard: 0,013 $\mu\Omega$

— Type B uncertainties

— due to the power dissipated in the standard during the readings: 0,01 $\mu\Omega$

— due to the measurement method, which is not rigorously potentiometric, and uncertainties in the values of the shunts, the tare, etc: 0,015 $\mu\Omega$

root sum square total $s = 0,022 \mu\Omega$

2. — Uncertainties in the final results of the comparisons

The analysis of the dispersion of the results obtained from the various travelling standards from the same laboratory provides a means of estimating the uncertainty in the value of the relationship between the representation of the ohm maintained by this laboratory and that maintained at the BIPM.

The calculation made for each laboratory leads to a widely dispersed range of values for the variance (from 0 to $145 \times 10^{-4} \mu\Omega^2$) having a mean of $29 \times 10^{-4} \mu\Omega^2$ or a standard deviation of 0,054 $\mu\Omega$.

However, this standard deviation does not take into account possible systematic errors in the measurements carried out in the national laboratories and at the BIPM. Assuming that the systematic uncertainties are of the same order of magnitude for the national laboratories as those of the BIPM, an additional component of $2 \times 3,25 \times 10^{-4} \mu\Omega^2$ should be added to the variance calculated above, giving $35,5 \times 10^{-4} \mu\Omega^2$, or a standard deviation of $6,0 \times 10^{-2} \mu\Omega$ as the uncertainty for the relationship obtained from one standard.

For those laboratories which used two standards, the standard deviation of the final result would be $10^{-2} (6,5 + 29/2)^{1/2} \mu\Omega$ or about 0,046 $\mu\Omega$; for those which used three standards, this would be $10^{-2} (6,5 + 29/3)^{1/2} \mu\Omega$ or about 0,040 $\mu\Omega$ and for those which used four standards $10^{-2} (6,5 + 29/4)^{1/2} \mu\Omega$ or about 0,037 $\mu\Omega$.

Addendum to the Report of the 14th comparison of
national standards of electrical resistance

**Estimation of the value of the representation of the ohm,
 Ω_{69-BI} , maintained at the BIPM, in ohms and its variation with time**

Since 1964 the value of Ω_{CSIRO} , the representation of the ohm maintained by the CSIRO, has been accurately determined in ohms by means of a calculable capacitor. Furthermore, over a period ending in 1985, seven successful comparisons between Ω_{CSIRO} and Ω_{69-BI} have been carried out, including a one-way comparison of February 1984 in which four resistors, made by the CSIRO, were sent to the BIPM where two remain permanently, two others having been forwarded, after measurement at the BIPM, to the NPL, also for permanent deposit.

In document CCE/86-13, presented to the seventeenth meeting of the CCE, the CSIRO reported uncovering a systematic error that occurred in all the determinations of Ω_{CSIRO} since 1974 and supplied corrected values for $\Omega_{69-BI} - \Omega_{CSIRO}$. Finally, in a recent paper ⁽¹⁾ the CSIRO reported an estimation of the uncertainties in the comparison of travelling standards and the ohm determinations, resulting in the data shown in Table E5-1.

Because they felt that a weighted linear least-squares fit would best take into account the general improvements in the comparisons and the ohm determinations, the CSIRO calculated a weighted least-squares fit to these results. The weight of each point is obtained by adding the components of the variance of the determination of the ohm (components which were thought to be different for almost each point, reflecting various experimental conditions) to the variance of the comparison at the BIPM and taking the reciprocal of the sum. The result is

$$\Omega_{69-BI} - \Omega_{CSIRO} = a + bt$$

where

t = time, in years, from 1986-01-01,

a = $-1,627 \mu\Omega$ (standard deviation : $s = 0,010 \mu\Omega$),

b = $-0,0618 \mu\Omega/\text{year}$ (standard deviation : $0,0015 \mu\Omega/\text{year}$).

⁽¹⁾ SMALL, G.W. Twenty years of SI ohm determinations at NML, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, IM-36, June 1987, pp. 190-195.

TABLE E5-1

Revised values and uncertainties of Ω_{69-BI} , in ohms, by means of determinations of the ohm at the CSIRO and comparisons between the CSIRO and the BIPM

Mean date	$\Omega_{69-BI} - \Omega_{CSIRO}$ ($\mu\Omega$)	in comparison with the BIPM	One standard deviation uncertainty ($\mu\Omega$)			total from all sources
			in determination of the ohm (variable part only)	quadrature sum of previous two columns*		
1964-01-26	- 0,31	0,093	0,065	0,114	0,138	
1967-02-18	- 0,45	0,093	0,065	0,114	0,138	
1970-02-01	- 0,57	0,079	0,032	0,085	0,108	
1973-02-25	- 0,80	0,068	0,071	0,098	0,119	
1977-05-19	- 1,11	0,021	0,020	0,029	0,070	
1984-02-10	- 1,50	0,028	0,010	0,030	0,068	
1985-03-24	- 1,58	0,020	0,010	0,023	0,065	

* The weights used in the calculation of the linear fit are the reciprocals of the squares of these standard deviations.

It should be noted that the values of a and b are not very sensitive to the values of weights. If an unweighted fit is used, a changes by about $0,01 \mu\Omega$ and b changes by an insignificant amount. The uncertainty given above for a and b are of type A. It should be borne in mind that additional type B components must be combined with them to arrive at the total uncertainties. From the right hand column giving the total uncertainty we can estimate that the type B component in a is presently less than about $0,06 \mu\Omega$.

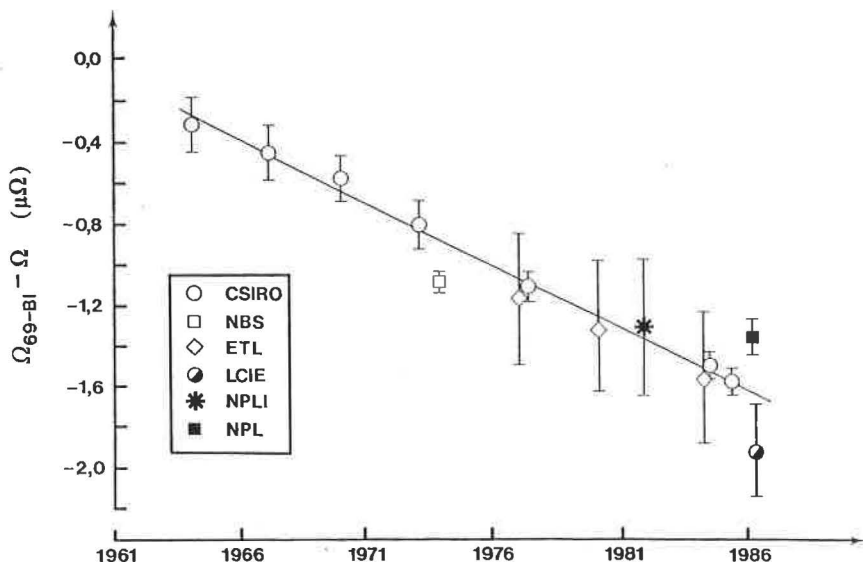


Fig. E5-1. — Variation in time of Ω_{69-BI} deduced from determinations of the ohm at the CSIRO.

Fig. E5-1 is a graph of Ω_{69-BI} in ohms vs time. The line is that obtained from the weighted fit described above. For comparison, values of Ω_{69-BI} derived from determinations of the ohm in other laboratories are also indicated.

June 1987

APPENDIX E 6

International comparison of ac electric power measurements

by R. BERGEEST

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Fed. Rep. of Germany)
(Document CCE/86-54)

Abstract. — This report deals with a comparison of national standards of ac electrical power initiated by the Comité Consultatif d'Électricité during its 15th meeting (1978). It was made by circulating two transfer instruments, a thermal wattmeter and a time-division type ac-dc power comparator. The participating laboratories had to measure the relative errors of these instruments at 120 V voltage, 5 A current, power factors of 1, 0,5, and 0, and at 53 Hz frequency. The eleven standardizing laboratories participating in this comparison were: BEV (Austria), EAM (Switzerland), IEN (Italy), LCE (Belgium), LCIE (France), NBS (USA), NPL (England), NRC (Canada), PTB (FRG), SBM-BMD (Belgium), and VSL (The Netherlands). The Physikalisch-Technische Bundesanstalt acted as the pilot laboratory and made available the transfer instruments. In the area of the European Community the work was supported by the Community Bureau of Reference (BCR).

Introduction

Ac electric power is a quantity which is derived from the basic standards of dc voltage and dc resistance and its realization involves an ac-dc transfer. There is no reference element of ac power. The different calibration systems of the metrological laboratories establish the national standards of ac power. These systems are stationary and would be extremely difficult to transport. In order to compare these systems, transfer instruments which are sufficiently stable and accurate must be used.

The transfer instruments and the quantity to be measured

For measurements at power factors of 1 and 0,5, inductive and capacitive, a thermal wattmeter ⁽¹⁾ was used as the transfer instrument, the principle of which is based on a thermal converter which indirectly multiplies the voltage signal by the current signal and performs an ac-dc transfer. Precisely known real (active) ac power P_r , traceable to the basic dc quantities of voltage and resistance by means of the ac power calibration systems, had to be applied to the instrument. The participants in the comparison were asked to take a total of 15 readings of the indicated power P_i over three different days. The relative deviation

$$\delta_p = \frac{P_i - P_r}{P_a},$$

where P_a is the apparent power (the product: rms voltage times rms current), should be calculated and given as the result.

For checking purposes the thermal wattmeter can also measure dc voltages. In this case only the input transformer sections are bypassed. During the comparison some readings of the indicated voltage V_i at a well-known applied dc voltage V_a were taken, resulting in the relative deviation

$$\delta_V = \frac{V_i - V_a}{V_a}.$$

At zero power factor (inductive and capacitive) an ac-dc power comparator with a time-division multiplier ⁽²⁾ was used for the comparison measurements. In this case the phase angle between voltage and current applied to the instrument was precisely set to 90° by means of the calibration systems of the metrological laboratories. The relative deviation to be stated for these measurements is

$$\delta_p = \frac{P_i}{P_a},$$

which is the ratio of the power indicated by the instrument to the apparent power.

The procedure for circulation of the transfer instruments and their stability

The two transfer instruments were transported by car between the participating laboratories except for transport to and from Canada and the United States of America. A special container fitted with shock-absorbing material was used. The comparison started with initial measurements in October 1980 and ended with final measurements in August 1984, both at the PTB. The instruments were circulated in six minor loops each containing no more than three laboratories, and their stability was monitored during five intermediate measurements at the PTB. These PTB measurements revealed a linear drift for the time-division type of power comparator of about $3,6 \times 10^{-6}$ per year during the whole period of the intercomparison.

The behaviour of the thermal wattmeter was not as stable as expected. During the first two years a more or less linear drift of about 31×10^{-6} per year was found for power measurements at a power factor of 1; then the instrument seemed to be stable within a few parts in 10^6 for about one year, but during the final measurements at the PTB changes of 30×10^{-6} occurred within 2 months. Fortunately, equivalent internal fluctuations of the instrument were measured not only for the ac power calibrations but also for the dc voltage measurements, which suggests the application of a drift compensation method as described in the next section.

Measurement results

In order to get rid of the internal drifts and fluctuations of the transfer instruments two different compensation methods were applied to the two instruments. For the time-division type of power comparator used for measurements at zero power factor, a linear regression line was calculated from the PTB measurements, and the deviation of the results of the individual laboratories from this line was used as the actual result. Afterwards these results were shifted in parallel in order to get zero as the mean value from the relative deviation figures of all participants. The associated standard deviation (1σ) for these results is listed in Table E6-1.

A reasonable method to compensate for the internal drift and fluctuation of the thermal wattmeter is to compare the ac power calibration results with the dc voltage measurement results. Both types of measurements suffer in the same way from these fluctuations, and both results were requested from all participants.

Using this procedure of comparing ac with dc results has an additional advantage, as the individual standard calibration systems for ac power are based on a dc reference voltage, and the dc voltage calibration of the thermal wattmeter is referred to the same dc reference voltage. By using the thermal wattmeter as an ac/dc transfer instrument, the dc power to ac power transfer accomplished by the individual standard calibration systems of the different laboratories may be compared with one another.

As a result of the ac/dc transfer calculation, first-order variations of the short-term drift of the thermal wattmeter at different places are eliminated because internal fluctuations influence the ac power or dc voltage measurements of the instrument in the same manner.

For each participant, a value of the ac/dc transfer error, δ_T , of the thermal wattmeter was calculated from the equation

$$\delta_T = \delta_p - 2 \delta_v \cos \Phi$$

where the measured ac power error δ_p and the measured dc voltage error δ_v were determined by each laboratory. For unity power factor the nominal dc voltage is 6 V. For power factor $\cos \Phi = 0,5$, $\Phi = 60$ degrees resulting in a dc voltage $(6 \text{ V} \cdot \sin 60^\circ) \simeq 5 \text{ V}$. All values of δ_p are referred to the apparent power.

Table E6-1 lists the standard deviations s of the observed values of δ_T for the five indicated conditions of power factor and reactance. For the case of unity power factor, the value of s is based on eleven results and for the remaining cases on ten results.

TABLE E6-1

Standard deviation of the drift-compensated δ_T results

Power factor and type of load	Standard deviation s of δ_T in 10^{-6}
1	18,9
0,5 inductive	15,3
0,5 capacitive	17,1
0 inductive	28,7
0 capacitive	31,1

Conclusion

The international comparison of ac power measurements described was the first with such a large number of participants. There have previously been only a few comparisons in this field and then only between three laboratories (^{3,4}). Apart from measurements at power factors of unity and 0,5 as in these earlier comparisons, it was decided also to compare the calibration systems at 90 degrees phase shift in order to obtain precise information about possible phase deviations.

The standard deviation of about 3×10^{-5} or less of the ac/dc power transfer at the different power-factor settings of all eleven participants is a satisfying result and justifies the effort involved in the intercomparison measurements. More detailed results will be presented elsewhere (^{5,6}).

References

- [1] SCHUSTER, G. Thermal instrument for measurement of voltage, current, power, and energy at power frequencies. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-29**, 1980, pp. 153-157.
 - [2] BERGEEST, R., FRIEDL, R., and SEYFRIED, P. High precision electronic measuring equipment for electrical power and energy, *IEE Conf. Pub.*, **113**, 1974, pp. 144-146.
 - [3] McAULIFF, R.C., LENTNER, K.J., MOORE, W.J.M. and SCHUSTER, G. An international comparison of power measurements at 120 V, 5 A and 60 Hz. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-27**, 1978, pp. 445-449.
 - [4] TSCHAPPU, F. *Landis & Gyr-Mitteilungen*, **28**, 1981, p. 15.
 - [5] BERGEEST, R. Intercomparison of AC electric power measurements in the European Communities, *BCR Information : Applied metrology*, Report EUR 10813 EN, Commission of the European Communities, 1986, 110 pages.
 - [6] Joint report of all participants (to be published).
-

APPENDIX E 7

Power in coaxial line at 6 GHz

(Comparison N° 72-6)

by Manly P. WEIDMAN

National Bureau of Standards (Boulder, U.S.A.)

(Document GT-RF/86-6)

The intercomparison is finally complete after almost ten years. The intercomparison was established under the auspices of the CIPM in Sèvres in October 1972. Actual measurements were started in October 1974.

The nine national laboratories involved in the intercomparison were NBS (United States, pilot laboratory), RIND (Sweden), NRC (Canada), IEN (Italy), NPL (United Kingdom), PTB (Federal Republic of Germany), OMH (Hungary), LCIE (France), and CSIRO (Australia). Contacts at each of the laboratories were R. Bostrom and G. Nilsson (RIND), A. Jurkus (NRC), G. Rietto (IEN), A. Fantom (NPL), H. Bayer (PTB), H. Szokol (OMH), L. Érard (LCIE) and D. Hollway (CSIRO).

The intercomparison package consisted of three commercial thermistor mounts, one each of Type N, GR-900 and APC-7 connector types. Along with the thermistor mounts were five adapters for connection between the three connector types. Participants were asked to measure as many of the configurations as possible. The primary parameter measured was the effective efficiency of the three thermistor mounts. Direct and indirect measurements of adapter efficiencies were summarized to yield intercomparisons between all laboratories, even though not all laboratories were able to measure three connector types. Results and uncertainties were reported to the pilot laboratory and a composite of all measurements was plotted for each of the three mounts.

The transfer standards and adapters were first measured at NBS and then were sent to CSIRO. From CSIRO the standards went to NPL, LCIE and then back to NBS where they were remeasured. From NBS, the package went to IEN where they were not measured but were sent on to RIND, NRC and back to NBS where two of the mounts were remeasured. The standards were then sent to PTB, IEN and back to NBS with the same two mounts remeasured. The package went to OMH and finally back to NBS. No noticeable changes occurred during the years and travels. It is not recommended that an intercomparison of this size (nine laboratories, 3 connector types) be attempted in the future if a faster completion time is expected.

It was assumed that a particular mount/adaptor combination had a combined efficiency which was the product of the effective efficiency of the mount and the efficiency of the adapter under specific impedance conditions. Two laboratories measured all of the possible configurations of mounts plus adapters. Adapter efficiencies were derived from these data. Systematic measurement uncertainties cancel in this type of comparison (bias in mount efficiency and mount/adaptor combination are typically in the same direction). After looking at the adapter data it was assumed that $\pm 0,3\%$ was a reasonable additional uncertainty to include for non-direct measurements of thermistor effective efficiency.

Fig. 1 shows the different configurations of adapters and thermistor mounts at the beginning of the intercomparison. Some laboratories were able to measure more configurations than are shown in Fig. E7-1 and some measured fewer.

The laboratories numbered in Fig. E7-2 and Table E7-1 are as follows : 1. NBS ; 2. CSIRO ; 3. NPL ; 4. LCIE ; 5. RIND ; 6. NRC ; 7. PTB ; 8. IEN ; 9. OMH.

The graph in Fig. E7-2 shows each laboratory's measurements (either direct or calculated) with associated systematic or overall uncertainty. As described previously, calculated values in Fig. E7-2 include the laboratory uncertainty for the mount/adaptor combination plus an additional uncertainty of $\pm 0,3\%$ for the adapter. As an example, laboratory « A » measures a Type N mount with a Type N female to APC-7 adapter to arrive at a total efficiency of $\eta_{eN} \times \eta_{aN7}$ where η_{eN} is the Type N mount effective efficiency and η_{aN7} is the adapter efficiency under the given impedance conditions. Then using the overall results for η_{aN7} one can calculate η_{eN} for the laboratory « A » measurement. The uncertainty for η_{eN} is then the uncertainty in $(\eta_{eN} \times \eta_{aN7})$ plus the uncertainty in the adapter or $\pm 0,3\%$.

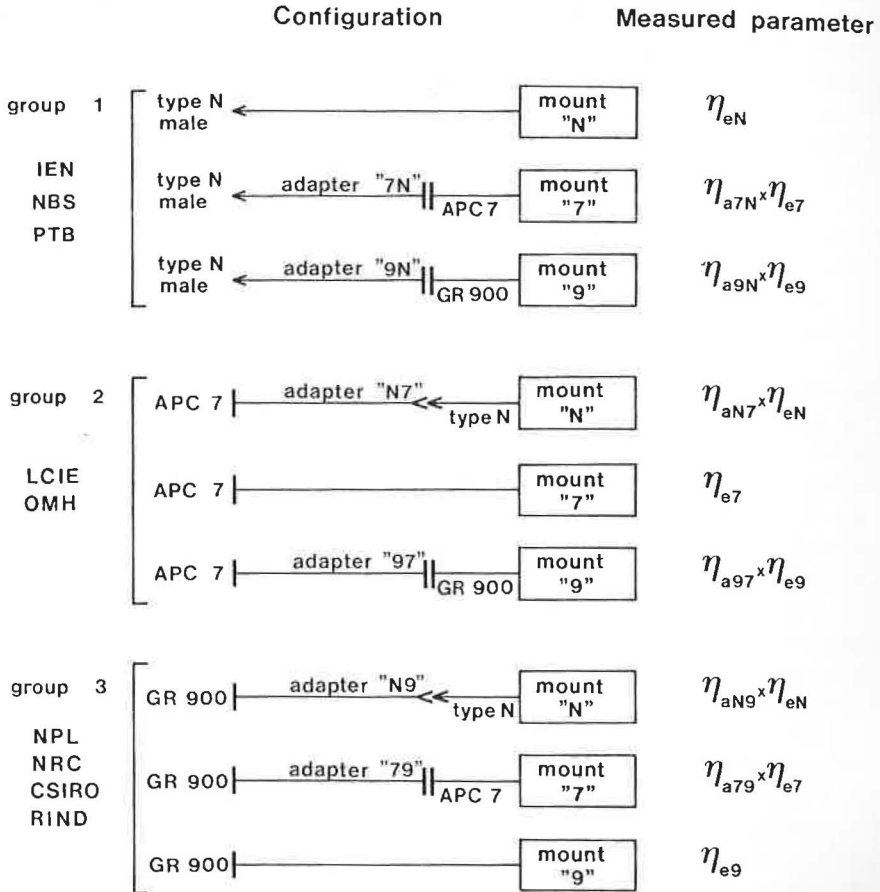


Fig. E7-1. — Configurations of adapters and thermistor mounts used and the corresponding measurement parameters, namely, either the effective efficiency of the mount alone or of the combination mount and adapter. Adapter « 79 » is adapter « 97 » reversed.

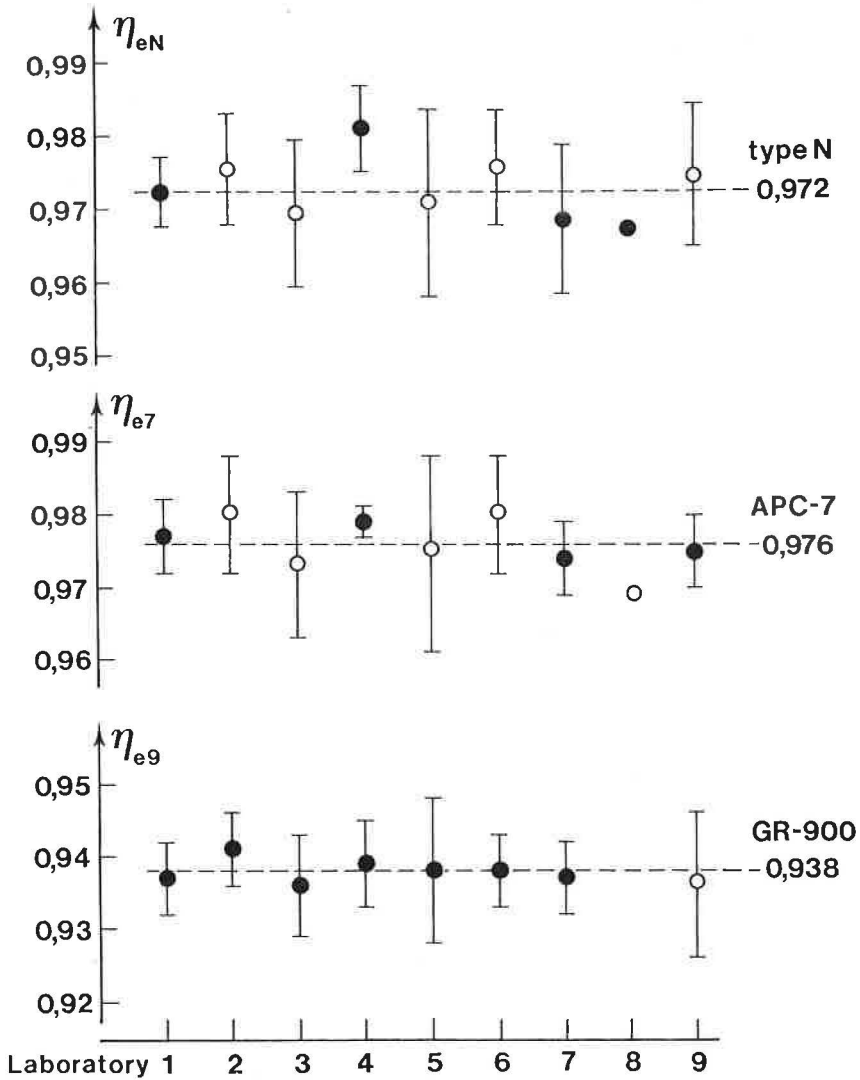


Fig. E7-2. — Efficiencies of three thermistor mounts, type N, APC-7 and GR-900, determined by nine laboratories. Solid circles: direct measurements. Open circles: values determined from measurements with adapters, in which case the uncertainty is increased by $\pm 0,3\%$. The dotted lines represent the means of all determinations.

TABLE E7-1
Raw data and averages

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Averages
η_{EN}	$0,972 \pm 0,5\%$	$0,975$ calc.	$0,969$ calc.	$0,981 \pm 0,6\%$	$0,970$ calc.	$0,975$ calc.	$0,968 \pm 1\%$	$0,967$	$0,974$ calc.	$0,972$
η_{E7}	$0,977 \pm 0,5\%$	$0,980$ calc.	$0,973$ calc.	$0,979 \pm 0,2\%$	$0,975$ calc.	$0,980$ calc.	$0,974 \pm 0,5\%$	$0,969$ calc.	$0,975 \pm 0,5\%$	$0,976$
η_{E9}	$0,937 \pm 0,5\%$	$0,941 \pm 0,5\%$	$0,936 \pm 0,7\%$	$0,939 \pm 0,6\%$	$0,938 \pm 1\%$	$0,938 \pm 0,5\%$	$0,937 \pm 0,5\%$		$0,936$ calc.	$0,938$
$\eta_{E10} \times \eta_{E7}$	$0,969 \pm 0,5\%$	$0,974 \pm 0,5\%$	$0,967 \pm 0,7\%$		$0,969 \pm 1\%$	$0,974 \pm 0,5\%$	$0,969 \pm 0,5\%$			$0,970$
$\eta_{E10} \times \eta_{E8}$	$0,964 \pm 0,5\%$	$0,968 \pm 0,5\%$	$0,962 \pm 0,7\%$		$0,963 \pm 1\%$	$0,969 \pm 0,5\%$	$0,964 \pm 1\%$			$0,965$
$\eta_{E7N} \times \eta_{E7}$	$0,960 \pm 0,5\%$						$0,945 \pm 1\%$	$0,947$		$0,951$
$\eta_{E9N} \times \eta_{E9}$	$0,931 \pm 0,5\%$						$0,930 \pm 1\%$			$0,931$
$\eta_{E97} \times \eta_{E9}$	$0,930 \pm 0,5\%$			$0,934 \pm 0,4\%$			$0,930 \pm 1\%$		$0,931 \pm 0,7\%$	$0,931$
$\eta_{E97} \times \eta_{E8}$	$0,965 \pm 0,5\%$			$0,970 \pm 0,4\%$			$0,965 \pm 1\%$		$0,967 \pm 0,7\%$	$0,967$

Some participants measured many combinations of mounts and adapters, but only the lowest uncertainty measurement on each of the three mounts is shown in Fig. E7-2. Laboratory 8 did not report an uncertainty, nor did they measure the GR-900 mount. Some of the measurements shown in Fig. E7-2 were done in a microcalorimeter and some were done on a transfer system, i.e., as a secondary type measurement.

Table E7-1 shows the raw data (some values calculated) with the reported uncertainties and averages.

The pilot laboratory thanks all of the participants in the intercomparison, and especially the early participants for their patience.

APPENDIX E 8

International comparison of attenuation in waveguide R140 (WG18, WR 62) at the frequency 15 GHz

(Comparison N° 75-A3)

by H. BAYER

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Fed. Rep. of Germany)

The final report of this comparison was published in *BIPM Monographie* 85/1 and *Metrologia*, 23, 1986/87, pp. 121-127. The results are summarized in Document CCE/86-3.

Abstract. — This report deals with the results of an international intercomparison of attenuation in waveguide R 140 (WG 18, WR 62) at the frequency 15 GHz, which was decided and organized by the Working Group on Radiofrequency Quantities of the Comité Consultatif d'Électricité of the Comité International des Poids et Mesures (CIPM). Its official designation is GT-RF 75-A 3. Five national institutes participated: IEN (Italy), NBS (U.S.A.), OMH (Hungary), RSRE (United Kingdom) and PTB (Federal Republic of Germany) as pilot laboratory. The five travelling standards — developed and made available by the participants — have the nominal attenuation values 0,01 dB, 0,1 dB, 10 dB, 20 dB, and 40 dB. The essential design principles and a short description of the measuring methods are given. The measurement results are presented in several tables and diagrams, followed by a discussion. The total uncertainties varied between $\pm 0,0002$ dB (at 0,01 dB) and almost $\pm 0,1$ dB (at 40 dB in the worst case). Apart from the 10 dB travelling standard all others exhibited excellent repeatability and a good long-term behaviour.

APPENDIX E 9

**Final report on international comparison of
peak laser power at 10,6 μm**
(comparison of photon-drag detector sensitivities)
(Comparison N° 78-8)

by R.W. YELL
National Physical Laboratory (United Kingdom)

Summary of document GT-RF/86-1,
by J.G. EDWARDS, P.A. SMITH and D.A.G. RODDIE (NPL)

This comparison was set up at the suggestion of NPL, with NBS as the other participant, to determine whether a new four-electrode photon-drag detector ⁽¹⁾ could provide a better transfer standard than the commercial detectors previously used. The new detector should have more stable electrodes and more uniform sensitivity over the working aperture. Three detectors were prepared by NPL and their input-referred sensitivity and transmission were measured. Two were sent to NBS for measurement and the third was kept at NPL as a control. The resistance and 10,6 μm transmission were measured to check any possible damage during transit or testing. The detectors were first measured at NPL in September-October 1983, at NBS in November-December 1983, and again at NPL in January 1984.

Measurement systems

In the NBS system ⁽²⁾, the pulse energy is measured by a calorimeter, using a beam splitter whose reflection factor is measured separately using a pair of interchangeable calorimeters. The measurements have systematic uncertainty of $\pm 4\%$ and random uncertainty (95% confidence level) of $\pm 1,5\%$.

In the NPL system (³), the pulse energy is measured by imaging an aperture that is fully illuminated by the laser beam on to either the photon-drag detector or a calorimeter, passing through a beam-splitting energy monitor used to compensate for shot-to-shot variation in the laser output. The measurements have systematic uncertainty of $\pm 2,8\%$ and random uncertainty (95% confidence level) of $\pm 3,5\%$.

Results

The detector kept at NPL as a control changed significantly during the test period for no obvious reason. The travelling standards were, however, substantially unchanged according to the NPL measurements.

Comparison of NPL and NBS measurements for the two detectors showed an average difference between the systems of 12%, which is well outside the combined claimed uncertainties. This is all the more significant since the repeatability of the measurements on the detectors at NPL was shown to be of the order of 0,5%.

Possible explanations for the discrepancy are (a) that one or other measurement system may be non-linear or (b) that the sources of systematic error are not completely understood. There is clearly a need for further study of the apparatus and techniques used in order to identify the source of the discrepancy and to permit a significant reduction of the claimed uncertainties.

References

- [1] EDWARDS, J.G., RODDIE, A.G. and SMITH, P.A. Improved electrodes for photon-drag detectors. *J. Phys. E*, **16**, 1983, pp. 526-531.
 - [2] SIMPSON, P.A. A system for measuring the characteristics of high peak power detectors of pulsed CO₂ radiation. *Natl. Bur. Stand. (US) Tech. Note*, **1023**, 39 pages.
 - [3] EDWARDS, J.G. and SMITH, P.A. Properties of some diffusers for CO₂ lasers. *J. Phys. E*, **14**, 1981, pp. 1326-1328.
-

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ

17^e session (1986)

	Pages
Notice sur les organes de la Convention du Mètre	v
Liste des membres	vii
Ordre du jour	x
Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par J. Vanier	E 1
Rapports des laboratoires	2
Effet Josephson (déclaration 1986/1 au sujet de la représentation du volt au moyen de l'effet Josephson; création du Groupe de travail sur l'effet Josephson)	3
Effet Hall quantique (déclaration 1986/2 au sujet de la représentation de l'ohm au moyen de l'effet Hall quantique; création du Groupe de travail sur l'effet Hall quantique)	7
État d'avancement des comparaisons internationales (étalons de capacité de 10 pF; rapport de la 14 ^e comparaison d'étalons nationaux de résistance; étalons de transfert courant alternatif/courant continu; mesures de puissance électrique en courant alternatif; inductance)	12
Rapport du Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences	13
Travaux du BIPM	14
Comparaisons internationales prévues	15
Questions diverses (incidence des changements futurs de l'EIPT-68)	15
Recommandations présentées au Comité International des Poids et Mesures ...	16
E1 (1986): Transfert du volt	16
E2 (1986): Au sujet de l'effet Hall quantique	17
Rapport du Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences	18
Comparaisons terminées depuis la dernière session (mars 1983)	18
Comparaisons en cours d'achèvement	18

Comparaisons en cours (comparaisons abandonnées, comparaisons maintenues).....	18
Comparaisons projetées	18
Sujets éventuels de comparaisons futures.....	19

Annexes

E 1. Documents de travail présentés à la 17 ^e session du CCE	29
E 2. Résumé des déterminations de $2e/h$, représentations du volt fondées sur l'effet Josephson et possibilités de comparer les étalons de tension, par B. N. Taylor (NBS) et T. J. Witt (BIPM).....	34
E 3. Résumé des déterminations de la résistance de Hall quantifiée et possibilités de comparer les étalons de résistance, par B. N. Taylor (NBS) et T. J. Witt (BIPM).....	35
E 4. BIPM. — Résultats de la troisième comparaison internationale circulaire des étalons de capacité en silice de 10 pF, par G. Leclerc.....	36
E 5. BIPM. — Rapport sur la 14 ^e comparaison des étalons nationaux de résistance électrique (novembre 1983, février 1984 et mars 1985), par G. Leclerc.....	42
E 6. PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — Comparaison internationale de mesures de puissance électrique en courant alternatif, par R. Bergeest	60
E 7. NBS (États-Unis d'Amérique). — Mesure de puissance en coaxial à 6 GHz, par M. P. Weidman	65
E 8. PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — Comparaison internationale d'affaiblissement à 15 GHz sur guide d'ondes R140 (WG 18, WR 62), par H. Bayer.....	71
E 9. NPL (Royaume-Uni). — Rapport final de la comparaison internationale de puissance de crête laser à 10,6 μm , par R. W. Yell.....	72
Notice for the reader of the English version ; Avertissement au lecteur de la version anglaise	75
Note on the organs of the Convention du Mètre	77
Agenda.....	80
Report to the Comité International des Poids et Mesures, by J. Vanier	83
Reports from the laboratories	84
Josephson effect (declaration 1986/1 concerning the Josephson effect for maintaining the representation of the volt ; Working Group on the Josephson Effect)....	85
Quantum Hall effect (declaration 1986/2 concerning the quantum Hall effect for maintaining a representation of the ohm ; Working Group on the Quantum Hall Effect).....	89
Progress reports on international comparisons (10 pF capacitance standards ; report on the 14th comparison of national standards of electrical resistance ; ac-dc transfer standards ; ac electrical power measurements ; inductance).....	94
Report of the Working Group on Radiofrequency Quantities.....	95
Current and future work at the BIPM	96
Future international comparisons.....	97
Miscellaneous subjects (expected changes in the IPTS-68 and their consequences for CCE).....	97

Recommendations submitted to the Comité International des Poids et Mesures :	
E 1 (1986) : Transfer of the volt	98
E 2 (1986) : Concerning the quantum Hall effect.....	99
Report of the Working Group on Radiofrequency Quantities.....	100
Comparisons completed since the last meeting of the Working Group (March 1983).....	100
Comparisons nearly completed.....	100
Comparisons in progress.....	100
New comparisons	100
Possible future topics for comparison	101

Appendices

E 1. Working documents submitted to the CCE at its 17th Meeting (<i>see</i> page E 29).....	109
E 2. A summary on determinations of $2e/h$, representations of the volt using the Josephson effect and abilities to compare voltage standards, by B. N. Taylor (NBS) and T. J. Witt (BIPM).....	111
E 3. A summary of determinations of the quantized Hall resistance and abilities to compare resistance standards, by B. N. Taylor (NBS) and T. J. Witt (BIPM).....	122
E 4. BIPM. — Results of the third circular international comparison of 10 pF silica capacitance standards, by G. Leclerc	137
E 5. BIPM. — Report on the fourteenth intercomparison of national standards of electrical resistance, by G. Leclerc	143
E 6. PTB (Fed. Rep. of Germany). — International comparison of ac electric power measurements, by R. Bergeest.....	161
E 7. NBS (U.S.A.). — Power in coaxial line at 6 GHz, by M. P. Weidman....	166
E 8. PTB (Fed. Rep. of Germany). — International comparison of attenuation in waveguide R140 (WG 18, WR 62) at the frequency 15 GHz, by H. Bayer.....	172
E 9. NPL (United Kingdom). — Final report on international comparison of peak laser power at 10,6 μm , by R. W. Yell.....	173





IMPRIMERIE DURAND

28600 LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1987, n° 6014
ISBN 92-822-2100-8

ACHEVÉ D'IMPRIMER : DÉCEMBRE 1987

Imprimé en France

