

## **19<sup>e</sup> CONFÉRENCE GÉNÉRALE DES POIDS ET MESURES**





**BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES**



**19<sup>e</sup> CONFÉRENCE GÉNÉRALE  
DES POIDS ET MESURES**

**(1991)**

**COMPTES RENDUS  
PROCEEDINGS**

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

ISBN 92-822-2122-9  
ISSN 1016-5893

**COMPTES RENDUS DES SÉANCES  
DE LA 19<sup>e</sup> CONFÉRENCE GÉNÉRALE  
DES POIDS ET MESURES**

Réunie à Paris en octobre 1991 sous la présidence de

M. Jean HAMBURGER

Président de l'Académie des Sciences de l'Institut de France

Président par délégation

M. André MARÉCHAL

Membre de l'Académie des Sciences,  
ancien membre du Comité international des poids et mesures

---

**Mesdames, Messieurs les délégués des États signataires de la Convention du Mètre**

(Les noms des membres du Comité international des poids et mesures  
sont précédés d'un astérisque)

**Afrique du Sud**

N.

**Allemagne (République fédérale d')**

S. GERMAN, vice-président de la Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig.

V. KOSE, directeur, membre du comité de direction de la PTB, Braunschweig.

W. VON STACKELBERG, conseiller scientifique d'ambassade, Paris.

\*D. KIND, président de la PTB, Braunschweig, président du Comité international des poids et mesures.

**Amérique (États-Unis d')**

- \*J. W. LYONS, directeur, National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg.
- Mme J. BUNCHER, Office of Science and Technology, Department of State, Washington.
- G. A. SINNOTT, directeur, International and Academic Affairs, NIST, Gaithersburg.
- M. A. G. MICHAUD, conseiller aux affaires scientifiques et techniques à l'ambassade, Paris.

**Argentine (République)**

- \*R. STEINBERG, chef du département de physique et métrologie, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Buenos Aires.

**Australie**

- \*W. R. BLEVIN, directeur, division de physique appliquée, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Lindfield (Sydney).

**Autriche**

- G. FREISTETTER, conseiller, ministère fédéral des Affaires économiques, chargé de la métrologie légale, Vienne.
- R. GALLE, directeur, service de la métrologie, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Vienne.

**Belgique**

- H. VOORHOF, inspecteur général, Inspection générale de la métrologie, ministère belge des Affaires économiques, Bruxelles.

**Brésil**

- G. MOSCATI, directeur, métrologie scientifique et industrielle, INMETRO, Duque de Caxias, Rio de Janeiro.
- M. C. FAGUNDES, chef, Inductance and Capacitance Laboratory, INMETRO, Duque de Caxias, Rio de Janeiro.
- Mme L. CONTIER DE FREITAS, chef, Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Rio de Janeiro.

**Bulgarie**

- V. GAVRAILOV, vice-président du Comité national de normalisation, certification et métrologie, Sofia.
- S. SIMEONOV, expert en coopération internationale, Comité national de normalisation, certification et métrologie, Sofia.

**Cameroun**

N.

**Canada**

J. VANIER, directeur général, Institut des étalons nationaux de mesure, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa.

\*H. PRESTON-THOMAS, Ottawa, vice-président du Comité international des poids et mesures.

**Chili**

N.

**Chine (République populaire de)**

BAI Jingzhong, directeur général adjoint, Bureau d'État de la supervision technique (BEST), Beijing.

\*WANG Daheng, directeur, département de la science et de la technologie, Academia Sinica, Beijing.

GAO Jie, professeur, ingénieur en chef, National Institute of Measurement and Testing Technology, Chengdu.

FENG Liming, chargé de mission, département de la coopération internationale, BEST, Beijing.

**Corée (République de)**

Seung-Duk PARK, président, Korea Standards Research Institute (KSRI), Séoul.

Byung-Ju LIM, directeur, Weighing and Measuring Division, Industrial Advancement Administration, Séoul.

Nak-Sam CHUNG, directeur, Division of Electrical Metrology, KSRI, Séoul.

**Corée (République populaire démocratique de)**

N.

**Danemark**

\*H. H. JENSEN, professeur honoraire, conseiller auprès du Danish Institute of Fundamental Metrology, Lyngby, secrétaire-adjoint du Comité international des poids et mesures.

Mme M. RASMUSSEN, directeur adjoint, National Agency of Industry and Trade, Copenhague.

K. CARNEIRO, directeur, DFM, Lyngby.

P. C. JOHANSEN, chef, Metrology Division, National Agency of Industry and Trade, Copenhague.

**Dominicaine (République)**

N.

**Égypte (République arabe d')**

M. M. AMMAR, directeur, National Institute for Standards, Le Caire.

**Espagne**

J. A. FERNANDEZ HERCE, directeur, Centre espagnol de métrologie, Madrid.

J. L. FLORES CALDERON, sous-directeur technique, Centre espagnol de métrologie, Madrid.

**Finlande**

Mme U. A. LÄHTEENMÄKI, directeur, Centre for Metrology and Accreditation, Helsinki.

T. KOIVUMÄKI, inspecteur principal, Ministry of Trade and Industry, Helsinki.

**France**

J. CARPENTIER, président du comité de direction du Bureau national de métrologie (BNM), Paris.

\*J. KOVALEVSKY, membre de l'Institut, astronome au Centre de recherches en géodynamique et astrophysique, Grasse, secrétaire du Comité international des poids et mesures.

J. BLOUET, secrétaire général du BNM, Paris.

Mlle F. CARBON, chargée de mission, direction des Nations unies, ministère des Affaires étrangères, Paris.

**Hongrie**

D. BELEDI, président, Office national des mesures (OMH), Budapest.

P. PÁKAY, vice-président de l'OMH, Budapest.

**Inde**

Mme S. SINGH, premier secrétaire d'ambassade, Paris.

R. C. CHADHA, section commerciale de l'ambassade, Paris.

**Indonésie**

G. M. PUTERA, directeur, Directorate of Metrology, Ministry of Trade, Bandung.

**Iran**

N.

**Irlande**

J. LAWTON, chargé d'affaires d'ambassade, Paris.  
B. NOLAN, premier secrétaire d'ambassade, Paris.

**Israël**

A. SHENHAR, directeur, National Physical Laboratory of Israel, Jérusalem.

**Italie**

M. MURGO, président, Comité central métrique, Rome.  
\*A. BRAY, président, Commission pour la métrologie, Institut de métrologie G. Colonnetti (IMGC), Turin.  
L. CROVINI, directeur, IMGC, Turin.  
G. ZINGALES, membre de la Commission pour la métrologie, professeur de mesures électriques à l'université, Padoue.  
G. RICCIONI, directeur, Bureau central métrique, Rome.  
F. BONI, coordinateur, Laboratoire de métrologie du Bureau central métrique, Rome.

**Japon**

S. HATORI, directeur général, National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba.  
\*K. IIZUKA, conseiller spécial, Agency of Industrial Science and Technology, Ministry of International Trade and Industry, Tokyo.  
S. IZUMI, premier secrétaire chargé des affaires scientifiques à l'ambassade, Paris.

**Mexique**

A. PORTAL ARIOSA, directeur général, Direction générale des normes, ministère du Commerce, Mexico.  
Mme C. DELGADO BRISEÑO, Université nationale autonome du Mexique, Mexico.  
C. E. MILLAN JARAMILLO, chef du Laboratoire de métrologie, Lakeside Farmaceuticos S.A., Toluca (Mexico).  
Mme M. LOPEZ MARTINEZ, sous-directeur de la métrologie, Direction générale des normes, ministère du Commerce, Mexico.  
F. SERRANO, directeur général, asunto juridicos, Secretaria de Comercio y Fomento Industrial, Mexico.

**Norvège**

K. BIRKELAND, directeur général, Service national de la métrologie, Oslo.

**Nouvelle-Zélande**

A. C. CORNEY, Group Manager Standards, Department of Scientific and Industrial Research, Lower Hutt.

**Pakistan**

N.

**Pays-Bas**

G. J. FABER, directeur général, Institut néerlandais de mesures, Delft.  
R. KAARLS, directeur, Van Swinden Laboratorium, Delft.  
Mme S. OVERMARS-WOUDA, Deputy Head, Division of Fair Trading, ministère des Affaires économiques, La Haye.  
\*J. DE BOER, professeur honoraire à l'université, Amsterdam.

**Pologne**

Z. REFEROWSKI, vice-président, Comité polonais de la normalisation, des mesures et du contrôle de la qualité (CPNMQ), Varsovie.  
A. HOUWALT, directeur, département de thermodynamique, CPNMQ, Varsovie.  
\*T. PLEBANSKI, directeur, Centre de recherche et de développement des matériaux de référence (WZORMAT), Varsovie.

**Portugal**

M. VICENTE, vice-président, Institut portugais pour la qualité, Lisbonne.

**Roumanie**

N. DRĂGULĂNESCU, président, Commission nationale pour la normalisation, la métrologie et la qualité, Bucarest.  
A. MILLEA, directeur, Institut national de métrologie, Bucarest.  
G. D. STOICHITOIU, directeur général, Inspection de la métrologie d'État, Bucarest.

**Royaume-Uni**

\*P. B. CLAPHAM, directeur, National Physical Laboratory, Teddington.

**Suède**

- \*K. SIEGBAHN, professeur, Institut de physique de l'université, Uppsala.
- O. MATHIESEN, Quality Manager, Swedish Board for Technical Accreditation (SWEDAC), Borås.
- A. J. THOR, Commission suédoise de la normalisation, secrétaire de l'ISO/TC 12, Stockholm.

**Suisse**

- B. VAUCHER, chef de division, Office fédéral de métrologie, Wabern.

**Tchécoslovaquie**

- V. SULÍK, président, Office fédéral pour la normalisation et les mesures, Prague.
- I. BREZINA, directeur, Institut tchécoslovaque de métrologie, Bratislava.
- \*J. SKÁKALA, professeur à l'Université technique slovaque, Bratislava, vice-président du Comité international des poids et mesures.

**Thaïlande**

- P. THENANONTA, directeur général adjoint, Department of Commercial Registration, Ministry of Commerce, Bangkok.
- S. JAOWISIDHA, conseiller commercial d'ambassade, Paris.
- V. VISUTTHATHAM, chef, Standards Sub-Division, Weights and Measures Division, Department of Commercial Registration, Ministry of Commerce, Bangkok.
- S. PANPAISAL, Weights and Measures Administrative Officer, Department of Commercial Registration, Ministry of Commerce, Bangkok.

**Turquie**

- A. EREN, directeur général, département des mesures et du contrôle de la qualité, ministère de l'Industrie et du Commerce, Ankara.
- E. GÜRLÜK, chef de section, ministère de l'Industrie et du Commerce, Ankara.

**URSS**

- \*V. I. POUSTOVOIT, vice-président, Comité d'État de l'URSS pour les normes (GOSSTANDART), Moscou.
- A. S. OBOUKHOV, chef de section, Institut des mesures physico-techniques et radiotechniques (VNIIFTRI), Moscou.
- E. GAZIEV, conseiller d'ambassade, Paris.

**Uruguay**

- N.

**Venezuela**

N.

**Yougoslavie**

M. EŽOV, directeur, Bureau fédéral des mesures et métaux précieux, Belgrade.

Z. MARKOVIC, chef de groupe pour la coopération internationale, Bureau fédéral des mesures et métaux précieux, Belgrade.

**Assistent à la Conférence**

T. J. QUINN, directeur, Bureau international des poids et mesures (BIPM), Sèvres.

P. GIACOMO, directeur honoraire, Bureau international des poids et mesures (BIPM), Sèvres.

Les représentants de l'Organisation internationale de métrologie légale (OIML), Paris (K. BIRKELAND, président de l'OIML, B. ATHANÉ, directeur du Bureau international de métrologie légale (BIML), A. THULIN, A. VICHENKOV, BIML).

Le personnel scientifique du Bureau international des poids et mesures.

---

## CONVOCATION

La Dix-neuvième Conférence générale des poids et mesures  
est convoquée pour le lundi 30 septembre 1991

### Constitution de la Conférence générale des poids et mesures

Convention du Mètre (1875) : article 3

« Le Bureau international fonctionnera sous la direction et la surveillance exclusives d'un *Comité international des poids et mesures*, placé lui-même sous l'autorité d'une *Conférence générale des poids et mesures*, formée de délégués de tous les Gouvernements contractants. »

Règlement annexé à la Convention du Mètre (1875) : article 7

« La Conférence générale, mentionnée à l'article 3 de la Convention, se réunira à Paris, sur la convocation du Comité international, au moins une fois tous les six ans.

« Elle a pour mission de discuter et de provoquer les mesures nécessaires pour la propagation et le perfectionnement du Système métrique, ainsi que de sanctionner les nouvelles déterminations métrologiques fondamentales qui auraient été faites dans l'intervalle de ses réunions. Elle reçoit le rapport du Comité international sur les travaux accomplis, et procède, au scrutin secret, au renouvellement par moitié du Comité international.

« Les votes, au sein de la Conférence générale, ont lieu par États : chaque État a droit à une voix.

« Les membres du Comité international siègent de droit dans les réunions de la Conférence ; ils peuvent être en même temps délégués de leurs Gouvernements. »

### Lieu et dates des séances

Toutes les séances se tiendront au  
Centre de conférences internationales, 19, avenue Kléber, Paris 16<sup>e</sup>,  
dans une salle gracieusement offerte par le  
Ministère des Affaires étrangères de France,  
avec interprétation simultanée en français, anglais et russe

Première séance, lundi 30 septembre 1991 à 10 h.  
Deuxième séance, lundi 30 septembre 1991 à 15 h.  
Troisième séance, mercredi 2 octobre 1991 à 15 h.  
Quatrième séance, jeudi 3 octobre 1991 à 15 h.  
Cinquième séance, vendredi 4 octobre 1991 à 10 h.  
Sixième séance, vendredi 4 octobre 1991 à 15 h.

Une visite du Bureau international, suivie d'une réception au Pavillon de Breteuil, aura lieu le mardi 1<sup>er</sup> octobre 1991 à 15 h.

**ORDRE DU JOUR PROVISOIRE**

1. Ouverture de la Conférence.  
Discours de Son Excellence M. le Ministre des Affaires étrangères de la République française.  
Réponse de M. le Président du Comité international des poids et mesures.  
Discours de M. le Président de l'Académie des Sciences de Paris, Président de la Conférence.
  2. Présentation des titres accédant les Délégués.
  3. Nomination du Secrétaire de la Conférence.
  4. Établissement de la liste des Délégués chargés de vote.
  5. Approbation de l'ordre du jour.
  6. Rapport de M. le Président du Comité international sur les travaux accomplis.
  7. Longueur et définition du mètre.
  8. Masse et grandeurs apparentées : état d'avancement de la troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme.
  9. La seconde et le Temps atomique international.
  10. Étalons électriques.
  11. Température, Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90).
  12. Photométrie et radiométrie.
  13. Rayonnements ionisants.
  14. Le Système international d'unités (SI).
  15. Programme des travaux futurs du Bureau international des poids et mesures.
  16. Dotation annuelle du Bureau international des poids et mesures.
  17. Propositions de MM. les Délégués.
  18. Renouvellement par moitié du Comité international.
  19. Questions diverses.
-

## COMMENTAIRES SUR LES PRINCIPAUX POINTS DE L'ORDRE DU JOUR

### 1. Ouverture de la Conférence

La date d'ouverture de la 19<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures se situe quatre ans après l'ouverture de la Conférence précédente. Cet intervalle paraît convenable à notre époque où la métrologie évolue rapidement par suite des progrès des sciences et des techniques et où ces mêmes progrès doivent pouvoir s'appuyer sur une métrologie constamment mise à jour.

### 2. Présentation des titres accréditant les Délégués

Pour la bonne organisation de la Conférence, il est souhaitable que la composition de chaque délégation soit communiquée au Bureau international des poids et mesures (BIPM) au plus tard quinze jours avant l'ouverture de la Conférence.

A leur arrivée, MM. les Délégués seront priés de présenter les titres accréditant leur délégation au secrétariat de la Conférence.

### 6. Rapport de M. le Président du Comité international des poids et mesures sur les travaux accomplis

L'article 19 du Règlement annexé à la Convention du Mètre stipule que « Le Président du Comité international rendra compte à la Conférence générale des travaux accomplis depuis l'époque de sa dernière réunion ».

Dans son rapport le Président attirera l'attention de la Conférence sur les changements importants qui sont intervenus en métrologie au cours des dernières années. On utilise de plus en plus des méthodes fondées sur des phénomènes quantiques pour réaliser et conserver, dans les laboratoires, des étalons de référence reproductibles mais indépendants; cela permet d'obtenir, tant dans les laboratoires nationaux que dans les laboratoires industriels, des mesures beaucoup plus reproductibles que par le passé. Le BIPM est le laboratoire central pour les comparaisons internationales d'étalons, traditionnels ou obtenus au moyen de ces nouvelles méthodes; son rôle a été examiné en fonction de la nécessité accrue de bien connaître le raccordement des étalons entre eux au niveau le plus élevé d'exactitude et ce, à l'échelle mondiale. Les conséquences qu'entraînent ces développements pour les laboratoires nationaux, les services nationaux d'étalonnage et le Bureau international des poids et mesures seront présentées.

### 7. Longueur et définition du mètre

Fournir des étalons de longueur, hautement exacts et commodes, à des fins diverses constitue l'une des tâches principales des laboratoires nationaux. C'est pourquoi la définition du mètre, adoptée en 1983, a été assortie d'un document donnant des indications sur sa mise en pratique; ce document comporte une liste de radiations recommandées utilisables comme étalons de longueur au niveau le plus élevé d'exactitude. Depuis 1983, des recherches ont été poursuivies dans les laboratoires nationaux et au BIPM pour accroître nos connaissances sur le comportement des lasers utilisés comme étalons de longueur d'onde. De nouvelles mesures ont été faites sur la plupart des longueurs d'onde recommandées et, pour un cas au moins, il est vraisemblable qu'il sera proposé de modifier la valeur adoptée. De plus, on étudie d'autres radiations à différentes longueurs d'onde en vue de les ajouter à la liste des

longueurs d'onde recommandées. Au lendemain de l'adoption de la nouvelle définition du mètre, en 1983, on a assisté à un ralentissement de la demande pour des comparaisons internationales de lasers, comparaisons qui avaient constitué l'une des activités essentielles du BIPM au cours des années antérieures; la situation a maintenant changé et une nouvelle série de comparaisons des différents lasers émettant les radiations recommandées pour la mise en pratique de la définition du mètre a débuté en 1988. La période plus calme qui s'est écoulée entre 1983 et 1988 a permis au BIPM de construire et de mettre au point ses propres lasers, qu'il utilise maintenant pour ces comparaisons.

En dépit de l'utilisation maintenant courante des interféromètres optiques de construction industrielle pour les mesures de longueur, les étalons à bouts et à traits ont toujours leur utilité et l'on constate actuellement au BIPM un accroissement de la demande d'étalonnage de règles à traits d'un mètre.

#### **8. Masse et grandeurs apparentées: état d'avancement de la troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme**

Conformément à la Résolution 7 de la 18<sup>e</sup> Conférence générale, la troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme a commencé en septembre 1988. Il est prévu qu'elle s'achève en 1991. Jusqu'à maintenant une trentaine d'États membres de la Convention du Mètre ont fait parvenir au BIPM leur prototype national. La première partie de la vérification a consisté à comparer le prototype international avec ses six témoins et avec les étalons d'usage courant du BIPM. Le prototype international et ses témoins ont tout d'abord été comparés à deux des étalons d'usage courant du BIPM, puis ils ont été lavés et nettoyés selon la méthode utilisée habituellement au BIPM et comparés de nouveau aux mêmes étalons d'usage courant. La diminution de masse du prototype international et de ses témoins, consécutive au nettoyage-lavage, se situait bien dans les limites attendues, compte tenu du temps écoulé depuis la précédente vérification. Toutefois, des mesures effectuées ultérieurement sur le prototype international, sur un témoin et sur deux autres étalons du kilogramme en platine iridié ont fait apparaître, au cours des quelques mois suivant le nettoyage-lavage, un accroissement de masse d'environ un microgramme par mois. Cela représente environ dix fois le taux d'accroissement à long terme que l'on déduit des mesures effectuées au BIPM sur des étalons en platine iridié conservés durant des périodes allant jusqu'à quatre-vingt-quinze ans.

Lors de sa session de 1989, le Comité international a discuté des conséquences de cette observation et des implications pratiques qui en résultent pour la troisième vérification. Le Comité international a décidé que, pour les besoins de la troisième vérification et conformément à ce qui a été fait à l'origine, le kilogramme est la masse du prototype international juste après nettoyage-lavage selon la méthode utilisée au BIPM. Un rapport sur l'état d'avancement de cette troisième vérification sera présenté à la 19<sup>e</sup> Conférence générale. Un programme d'études est en cours au BIPM et dans un certain nombre de laboratoires nationaux pour chercher à élucider les phénomènes qui entraînent des variations de la masse des étalons en platine iridié. D'autres études destinées à améliorer les propriétés métrologiques des balances et à évaluer la stabilité de certains alliages en acier inoxydable comme étalons de masse sont aussi en cours.

Le Comité international, avec l'aide de son Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées, poursuit son travail visant à améliorer l'uniformité des mesures de force, de pression, de masse volumique et de l'accélération due à la pesanteur. Dans ce dernier domaine, des comparaisons de gravimètres absolus ont été effectuées au BIPM en collaboration avec l'Union géodésique et géophysique internationale. Un rapport sur tous ces sujets concernant la masse et les grandeurs apparentées sera présenté à la Conférence générale.

### 9. La seconde et le Temps atomique international

Dans sa Résolution 3, la 18<sup>e</sup> Conférence générale a approuvé la décision du Comité international de prendre en charge la responsabilité du Temps atomique international (TAI) à la suite du Bureau international de l'heure (BIH). Depuis, le BIH a officiellement cessé d'exister. Il a été remplacé, à dater du 1<sup>er</sup> janvier 1988, par un nouveau service chargé uniquement de la rotation de la Terre, le Service international de la rotation terrestre (IERS). La nouvelle section du temps du BIPM est donc maintenant responsable du TAI et de sa diffusion ainsi que de celle du Temps universel coordonné (UTC) depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1988. Depuis le milieu de l'année 1985, la section du temps a été transférée de l'Observatoire de Paris au BIPM où elle est entièrement installée et où les équipements d'informatique et de télécommunication nécessaires sont maintenant en fonctionnement.

Depuis la 18<sup>e</sup> Conférence générale, en 1987, d'importants progrès ont été faits dans l'exactitude et l'accessibilité du TAI. Ces progrès sont dus, pour une grande part, à l'utilisation croissante des satellites du Global Positioning System (GPS) pour les liaisons horaires.

Il est maintenant clair, en grande partie grâce aux travaux du BIPM, que l'exploitation complète du GPS pour les comparaisons d'horloges distantes peut permettre d'améliorer de plus d'un facteur dix l'exactitude avec laquelle on peut effectuer des comparaisons d'échelles nationales de temps. L'exploitation des nouveaux résultats, très exacts, dont on dispose maintenant a déjà alourdi de façon significative la charge de travail du BIPM et a, par ailleurs, conduit le Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS) à proposer un certain nombre de nouvelles tâches au personnel. Le BIPM établit maintenant le programme international de poursuite des satellites et traite la plus grande partie des résultats. Divers programmes de recherche ont été entrepris à la demande du CCDS pour améliorer encore l'exactitude des comparaisons d'horloges, en améliorant la cohérence des coordonnées des antennes des laboratoires et en exploitant les mesures ionosphériques et les éphémérides précises des satellites. D'autres études sont nécessaires pour réduire les effets de la dégradation intentionnelle du GPS qui doit être prochainement imposée aux utilisateurs civils du système. Des recherches du même genre devront être faites sur le système soviétique GLONASS, sur les satellites commerciaux de communication et sur les interféromètres à très longue base utilisés pour les liaisons horaires.

Tenant compte de cette implication nouvelle et étroite du personnel du BIPM dans les aspects pratiques d'un certain nombre de tâches liées aux comparaisons d'horloges, le Comité international a suivi la recommandation de son Comité consultatif et a décidé de faire le nécessaire pour installer une référence de temps au BIPM en équipant celui-ci d'horloges commerciales à césium. Le Comité international considère comme important de conserver au BIPM un niveau élevé de compétence lui permettant de coordonner les comparaisons d'horloges qui constituent la base du TAI. Il est déjà souhaitable que le BIPM ait une expérience pratique de ces comparaisons et à l'avenir cela deviendra essentiel. Le Comité international a pris note du fait que l'expérience actuelle a été acquise grâce aux installations que l'Observatoire de Paris a généreusement mises à la disposition du BIPM; cette expérience est maintenue grâce à l'horloge à césium que l'US Naval Observatory (Washington D.C.) a fournie en prêt au BIPM pour une période d'un ou deux ans. L'achat d'horloges commerciales à césium et de l'équipement nécessaire aux comparaisons d'horloges n'avait pas été prévu dans le budget approuvé par la 18<sup>e</sup> Conférence générale. Le Comité international présente maintenant à la 19<sup>e</sup> Conférence générale une proposition d'augmentation spéciale de la dotation, destinée d'abord à acheter deux horloges à césium avec l'équipement nécessaire aux comparaisons d'horloges; à long terme cette augmentation devrait permettre de faire face aux dépenses de fonctionnement et de personnel pour entretenir et améliorer ces installations lorsque cela s'avérera nécessaire. Il convient de remarquer qu'aucune horloge installée au BIPM ne fait ni ne fera partie de l'ensemble des horloges qui constitue la base du TAI.

Bien que les progrès des horloges atomiques n'aient pas été très marqués ces dernières années, il paraît maintenant vraisemblable que des progrès rapides vont intervenir dans un avenir proche, en particulier en ce qui concerne la stabilité des horloges. Cela va entraîner des demandes de comparaisons plus précises ainsi que de nouvelles études sur la physique qui sert à établir le TAI. Il convient de remarquer qu'au niveau le plus élevé d'exactitude, la métrologie du temps doit faire appel à la théorie de la relativité. Pour le moment, on peut appliquer cette théorie de façon directe pour les horloges situées au sol mais le problème va se compliquer au fur et à mesure de l'amélioration de l'exactitude des horloges. On rencontre déjà des difficultés dans les applications spatiales et astronomiques du TAI. En dépit du fait que le temps est, parmi toutes les grandeurs de la physique, celle dont la mesure est de loin la plus exacte, l'exactitude actuelle ne satisfait pas complètement les besoins de la science et de la technique et elle se situe bien en-deçà de ce qui sera demandé à l'avenir.

Sur les conseils de son Comité consultatif pour la définition de la seconde, le Comité international a adopté un certain nombre de recommandations. Elles ont pour but de guider les recherches des laboratoires nationaux et du BIPM dans leur effort pour améliorer l'exactitude, l'uniformité et l'accessibilité du TAI et de l'UTC. Ces recommandations sont résumées dans le projet de résolution A présenté à la Conférence générale.

#### Étalons de temps et comparaisons de temps

##### *Projet de résolution A*

La 19<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures,

*considérant* que l'exactitude des comparaisons d'horloges distantes a été grandement améliorée par l'utilisation des techniques spatiales,

*constate* que cette exactitude

— peut encore être améliorée grâce à une meilleure utilisation des techniques courantes faisant appel aux satellites,

— fait apparaître les différences entre étalons atomiques de fréquence et leurs variations systématiques,

— permet une meilleure synchronisation des échelles nationales du temps,

*recommande*

— que soient construits de nouveaux étalons primaires à césium, que soit améliorée l'exactitude de la fréquence des étalons primaires existants et que l'on étudie les différences systématiques de fréquence qui existent entre eux,

— que les laboratoires qui participent à l'établissement du Temps atomique international (TAI) assurent la constance des conditions d'installation et de fonctionnement de chacune des horloges qui contribuent au TAI, conservent soigneusement trace de ces conditions et les communiquent au Bureau international des poids et mesures,

— que les coordonnées adoptées pour les antennes utilisées pour les comparaisons d'horloges par satellite, à sens unique, correspondent à leur position réelle dans le système de référence terrestre du Service international de la rotation terrestre.

#### 10. Étalons électriques

Conformément aux instructions qui lui ont été données par la Résolution 6 de la 18<sup>e</sup> Conférence générale, le Comité international a adopté en 1988 deux recommandations, qui ont pris effet au 1<sup>er</sup> janvier 1990 ; dans ces recommandations, il définit la constante de Josephson  $K_J$  et la constante de von Klitzing  $R_K$  et leur attribue les valeurs  $K_{J,90}$  et  $R_{K,90}$ , par convention. Dans le projet de résolution B, présenté ci-après, le Comité international demande à la 19<sup>e</sup> Conférence générale de ratifier ces décisions. Le Comité international a pris soin de préciser qu'en définissant ces nouvelles constantes il ne

donne en aucune façon une nouvelle définition ni du volt ni de l'ohm. Afin que cela soit bien clair, le Comité international a donné des instructions explicites sur la façon dont il faut se référer à ces nouvelles représentations du volt et de l'ohm et sur les symboles qu'il convient ou non d'utiliser.

La mise en œuvre, à dater du 1<sup>er</sup> janvier 1990, des recommandations du Comité international concernant  $K_{J-90}$  et  $R_{K-90}$  a eu pour effet immédiat d'apporter une amélioration très significative à la cohérence des mesures électriques sur le plan mondial. Cette amélioration se situe à un niveau perceptible pour de nombreux milieux scientifiques ou industriels qui utilisent des équipements électriques de mesure. On estime maintenant que la cohérence entre les laboratoires nationaux, qui fondent leurs étalons du volt et de l'ohm sur l'effet Josephson et sur l'effet Hall quantique, peut être meilleure que  $5 \times 10^{-8}$ ; cela fait encore l'objet d'une comparaison internationale qui est en cours au BIPM. On estime toutefois que la réalisation du volt et de l'ohm ne se situe qu'à un niveau d'environ  $4 \times 10^{-7}$  près. Il est par conséquent souhaitable que les recherches sur la réalisation des unités électriques SI soient poursuivies. Le projet de résolution B exprime ce souhait.

### L'effet Josephson et l'effet Hall quantique

#### *Projet de résolution B*

La 19<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures,

*considérant*

— que l'uniformité mondiale et la stabilité à long terme des représentations nationales des unités électriques sont particulièrement importantes pour la science, l'industrie et le commerce tant pour des raisons techniques que pour des raisons économiques,

— que de nombreux laboratoires nationaux utilisent maintenant l'effet Josephson ou l'effet Hall quantique pour conserver leurs représentations respectives du volt ou de l'ohm, ce qui leur donne une sécurité accrue en ce qui concerne la stabilité à long terme,

— que les valeurs attribuées à leurs représentations doivent être en accord aussi étroit que possible avec les unités du SI,

*rappelant* la Résolution 6 de la 18<sup>e</sup> Conférence générale concernant les ajustements envisagés à l'époque pour les représentations du volt et de l'ohm,

*tenant compte* des décisions prises par le Comité international des poids et mesures en 1988, lors de sa 77<sup>e</sup> session, au sujet de ces ajustements, et en particulier des valeurs  $K_{J-90}$  (égale à 483 597,9 GHz/V) et  $R_{K-90}$  (égale à 25 812,807  $\Omega$ ) attribuées par convention, respectivement, à la constante de Josephson  $K_J$  lorsqu'elle est utilisée pour représenter le volt et à la constante de von Klitzing  $R_K$  lorsqu'elle est utilisée pour représenter l'ohm,

*recommande*

— que les laboratoires nationaux poursuivent leurs efforts pour réduire l'incertitude sur la connaissance que l'on a des rapports  $K_{J-90}/K_J$  et  $R_{K-90}/R_K$ ,

— que soient poursuivies les recherches concernant la théorie fondamentale de l'effet Josephson et de l'effet Hall quantique.

### 11. Température, Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90)

Conformément aux instructions qui lui ont été données dans la Résolution 7 de la 18<sup>e</sup> Conférence générale et sur la proposition de son Comité consultatif de thermométrie, le Comité international a adopté en 1989 l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90), Échelle qui est entrée en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 1990, à la même date que les valeurs de  $K_{J-90}$  et de  $R_{K-90}$  concernant la représentation des unités électriques. Pour accompagner le texte de l'EIT-90, deux autres documents ont

été élaborés « Supplementary Information for the ITS-90 » et « Techniques for Approximating the ITS-90 ». Il est dans les intentions du Comité international que ces documents, qui sont publiés par le BIPM, soient mis à jour périodiquement. Dans le projet de résolution C, le Comité international demande à la 19<sup>e</sup> Conférence générale de ratifier l'adoption de l'ITS-90 et de souligner la nécessité de poursuivre les recherches fondamentales en thermométrie.

### **Échelle internationale de température de 1990 et travaux futurs en thermométrie**

#### *Projet de résolution C*

La 19<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures.

#### *considérant*

— que l'uniformité mondiale et la stabilité à long terme des mesures de température sont particulièrement importantes pour la science, l'industrie et le commerce, pour des raisons aussi bien techniques qu'économiques,

— que l'échelle internationale de température doit être aussi proche que possible de la température thermodynamique,

#### *rappelant*

— que, dans sa Résolution 7, la 18<sup>e</sup> Conférence générale avait invité le Comité international des poids et mesures et les laboratoires nationaux à préparer et adopter une nouvelle échelle internationale pour remplacer l'Échelle internationale pratique de température de 1968, dont on savait alors qu'elle s'écartait de façon significative de la température thermodynamique,

— que l'Échelle internationale de température de 1990 (ITS-90) adoptée par le Comité international en 1989, lors de sa 78<sup>e</sup> session, est dans son ensemble plus précise, plus facile à réaliser et plus étroitement en accord avec la température thermodynamique et par conséquent satisfait aux exigences mentionnées dans la Résolution 7 de la 18<sup>e</sup> Conférence générale,

*recommande* aux laboratoires nationaux de poursuivre leurs efforts pour améliorer l'uniformité mondiale et la stabilité à long terme des mesures de température en mettant rapidement en œuvre l'ITS-90 et de maintenir le niveau de leurs programmes de recherche fondamentale en thermométrie.

### **12. Photométrie et radiométrie**

À l'époque de l'adoption de la nouvelle définition de la candela par la 16<sup>e</sup> Conférence générale, en 1979, il avait été convenu que des comparaisons internationales devraient se dérouler afin d'étudier les résultats obtenus à partir de la nouvelle définition. Lors de la 18<sup>e</sup> Conférence générale, un rapport a été présenté sur les résultats de ces comparaisons internationales. Il constatait, dans une conclusion générale, une légère amélioration de l'uniformité des réalisations de la candela, la participation d'un nombre de laboratoires beaucoup plus important que précédemment et une grande diversité des méthodes employées. Depuis la 18<sup>e</sup> Conférence générale, des progrès significatifs ont été faits dans différentes parties de la radiométrie, et plus particulièrement de la spectroradiométrie, fondée sur les récepteurs : un certain nombre de laboratoires font appel maintenant à ces nouvelles techniques pour réaliser la candela. Répondant aux demandes que lui faisait depuis un certain nombre d'années son Comité consultatif de photométrie et radiométrie, le Comité international a décidé en 1985 qu'une partie des efforts consacrés à la thermométrie au BIPM serait reportée sur la radiométrie. Il a été rendu compte de cette décision à la 18<sup>e</sup> Conférence générale et un rapport sur l'état d'avancement de ces nouveaux travaux en spectroradiométrie et sur le programme pour l'avenir sera présenté à la 19<sup>e</sup> Conférence générale.

### 13. Rayonnements ionisants

Les améliorations apportées à la métrologie des rayonnements ionisants au cours des trente dernières années doivent beaucoup aux activités du Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants (CCEMRI) et à celles du BIPM, ainsi qu'au rôle joué par ces deux organisations pour coordonner et encourager les recherches des laboratoires nationaux dans ce domaine. La métrologie des rayonnements ionisants diffère de celle de bien d'autres grandeurs à cause des caractères particuliers de l'interaction des rayonnements ionisants avec la matière, notamment avec le corps humain. Les effets des rayonnements ionisants dépendent du type du rayonnement, de son intensité et de son énergie et, en général, ce que l'on connaît dans un domaine ne peut pas être étendu de façon simple à un autre. C'est pourquoi établir des étalons est une affaire complexe qui demande du temps. Néanmoins, il demeure essentiel que des mesures fiables de la dose absorbée soient faites dans le domaine de la dosimétrie et de la thérapie appliquées à l'homme ; c'est là que les demandes d'exactitude avoisinent le meilleur niveau possible. Par ailleurs, comme l'utilisation des rayonnements ionisants dans les domaines scientifiques et techniques est très étendue, il est nécessaire de disposer de mesures exactes. Pour faire face à ces demandes, le Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants continue de lancer un large éventail de comparaisons internationales, organisées pour la plupart par le BIPM. À la suite de la décision prise par le Comité international en 1985 de concentrer l'effort du BIPM sur les deux seuls domaines de la radioactivité et de la dosimétrie, de nouveaux travaux ont commencé dans ces domaines alors que l'activité dans le domaine des neutrons est maintenue à un niveau minimal. Un rapport sur les activités du CCEMRI et du BIPM dans ces domaines sera présenté à la 19<sup>e</sup> Conférence générale.

### 14. Le Système international d'unités (SI)

Le BIPM a publié la sixième édition de la brochure « Le Système international d'unités (SI) » préparée par le Comité consultatif des unités (CCU).

Les principales mises à jour de cette nouvelle édition concernent l'adoption par le Comité international des valeurs recommandées de la constante  $K_J$  de l'effet Josephson et de la constante  $R_K$  de l'effet Hall quantique, ainsi qu'une note sur l'Échelle internationale de température de 1990. Quelques modifications rédactionnelles mineures ont été aussi apportées. Comme la cinquième édition, la sixième est bilingue français-anglais.

Le Président du CCU présentera un rapport à la 19<sup>e</sup> Conférence générale sur les différentes questions qui ont été soumises à ce Comité consultatif depuis la Conférence générale précédente. Il a en particulier été demandé d'étendre la liste des préfixes SI qui permettent de former les noms des multiples et des sous-multiples des unités SI : le projet de résolution D que le CIPM soumet à la Conférence va dans ce sens.

#### Préfixes SI zetta, zepto, yotta et yocto

##### *Projet de résolution D*

La 19<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures,

décide d'ajouter à la liste des préfixes SI pour la formation des noms des multiples et sous-multiples des unités, adoptée par la 11<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures (CGPM), Résolution 12, paragraphe 3, la 12<sup>e</sup> CGPM, Résolution 8 et la 15<sup>e</sup> CGPM, Résolution 10, les préfixes suivants :

Facteur par lequel l'unité est multipliée	Préfixe	Symbole
$10^{21}$	zetta	Z
$10^{-21}$	zepto	z
$10^{24}$	yotta	Y
$10^{-24}$	yocto	y

### 15. Programme des travaux futurs du BIPM

Un programme détaillé des travaux du BIPM pour les années 1993 à 1996 sera proposé par le Comité international dans un document intitulé « Programme de travail et budget du Bureau international des poids et mesures pour les années 1993-1996 » ; il sera envoyé en complément à la présente convocation.

### 16. Dotation annuelle du Bureau international des poids et mesures

Les estimations financières seront données dans le document annoncé au point 15. On peut en résumer les conclusions comme suit.

La 18<sup>e</sup> Conférence générale a décidé d'accroître la dotation annuelle du BIPM de 5 % par an de 1989 à 1992. Grâce au ralentissement de l'inflation que l'on avait constaté au cours des années 1987 et 1988, le Comité avait pu proposer à la 18<sup>e</sup> Conférence générale de se charger de l'entière responsabilité des travaux courants de l'époque sur le TAI, exécutés précédemment par le Bureau international de l'heure, sans demander d'augmentation spéciale de la dotation. Au cours des années passées, le TAI, les mesures de tension et de résistance électriques fondées sur des effets quantiques, les mesures de longueur à l'aide de lasers stabilisés et la spectroradiométrie ont entraîné un accroissement important de la portée et du niveau intellectuel du travail scientifique du BIPM. Cela a exigé un élargissement correspondant des domaines de compétence du personnel scientifique ; il est donc devenu nécessaire de disposer d'une nouvelle bibliothèque et de davantage d'espaces de bureaux. En conséquence, le Comité a été conduit à construire un bâtiment, le Nouveau Pavillon, qui était en construction à l'époque de la 18<sup>e</sup> Conférence générale et dont l'inauguration a eu lieu en octobre 1988. Il était nécessaire et utile de construire un nouveau bâtiment et d'accroître la proportion du personnel scientifique le plus qualifié, mais cela a entraîné des dépenses. Les ressources mises à la disposition du BIPM ont en outre été grevées par la nécessité devant laquelle il s'est trouvé d'accroître de façon substantielle le fonds de retraite du personnel afin de le maintenir dans une situation actuarielle saine, en prévision des lourdes charges auxquelles ce fonds aura à faire face vers la fin des années 1990 et pendant la première décennie du siècle prochain.

Les fonds provenant de la dotation annuelle votée par les États membres ont été suffisants pour faire face à la plus grande partie des dépenses, mais pas tout à fait et il s'est avéré nécessaire de puiser dans les réserves. En conséquence, celles-ci sont réduites aux environs des deux tiers du budget annuel, niveau que le Comité considère comme trop bas.

De plus, la République démocratique allemande ayant décidé de faire partie de la République fédérale d'Allemagne, la dotation pour 1991 et 1992 est réduite de sa contribution, soit 1,75 %. La dotation devient ainsi 19 454 000 francs-or <sup>(1)</sup> en 1991 et 20 427 000 francs-or en 1992.

Cependant, la science et les techniques deviennent de plus en plus complexes et le BIPM ne peut remplir sa tâche qu'en évoluant de façon permanente. Le BIPM doit progresser et adapter son programme afin de faire face aux besoins des laboratoires nationaux des États membres de la Convention du Mètre. En préparant sa proposition de dotation pour les années comprises entre 1993 et 1996, le Comité a été très conscient de la nécessité de restreindre toute extension des travaux effectués au BIPM à un minimum qui permette de répondre à la demande des utilisateurs telle que l'on peut la prévoir maintenant. Il s'ensuit que le seul domaine de recherche scientifique pour lequel le Comité fasse une proposition d'accroissement en chiffres réels concerne les travaux liés au TAI. L'accroissement demandé dans ce but est de 625 000 francs-or, somme qui sera comprise dans la base de départ retenue pour le calcul de la dotation pour les années 1993-1996. L'augmentation ainsi obtenue servira d'abord à

---

<sup>(1)</sup> Le taux de conversion du franc-or en franc français, inchangé depuis 1969, est toujours de 1,814 52 franc français par franc-or.

financer l'achat des horloges et des équipements annexes permettant d'installer au BIPM une station permanente de mesure du temps ; elle donnera aussi, pour les années à venir, les ressources nécessaires à l'entretien et à l'amélioration de cette station selon les directives données par le CCDS.

Pour le BIPM dans son ensemble, et bien qu'aucune extension du programme ne soit envisagée, l'évolution et l'amélioration des installations et des bâtiments doivent se poursuivre. L'expérience passée a montré qu'un accroissement du budget total de 2 % par an au-dessus du taux d'inflation générale des prix en France constitue le minimum nécessaire pour permettre au BIPM de maintenir un niveau constant d'activité tout en conservant le niveau nécessaire de compétence.

En supposant que l'inflation annuelle des prix en France demeure égale ou inférieure à 5 %, le Comité propose par conséquent une augmentation annuelle de 7 % de la dotation du BIPM pour les années comprises entre 1993 et 1996.

Comme base de départ du calcul de la dotation pour les années 1993 à 1996, le Comité propose la somme de 21 052 000 francs-or. Cette somme est obtenue en partant de la dotation pour 1992 votée par la 18<sup>e</sup> Conférence générale, soit 20 791 000 francs-or, en la réduisant de 1,75 %, ce qui donne 20 427 000 francs-or, puis en ajoutant 625 000 francs-or. Sur cette base, le Comité international demande à la Conférence générale d'accroître la dotation pour les années 1993 à 1996 et d'adopter les valeurs suivantes :

1993 : 22 526 000 francs-or  
 1994 : 24 103 000 francs-or  
 1995 : 25 790 000 francs-or  
 1996 : 27 596 000 francs-or.

Toutefois, si les prévisions relatives à l'inflation des prix en France changent de façon significative d'ici à la 19<sup>e</sup> Conférence générale, le Comité international pourrait être conduit à modifier cette proposition en conséquence.

#### 17. Propositions de MM. les Délégués

Les délégations des États sont priées de faire connaître au Comité international les vœux ou propositions qu'elles désirent soumettre à la Conférence générale aussi rapidement que possible et en tout cas au moins six mois avant la Conférence (décision de la 7<sup>e</sup> Conférence générale (1948) : « les vœux ou propositions ainsi déposés seront transmis par le bureau du Comité à tous les États adhérents à la Convention, au moins quatre mois avant l'ouverture de la Conférence afin que MM. les Délégués puissent recevoir les instructions et pouvoirs nécessaires. Tout autre vœu ou proposition ne sera présenté à la Conférence qu'à la condition que le Comité ait eu le temps nécessaire de l'étudier et l'aura approuvé »).

#### 18. Renouvellement par moitié du Comité international

Conformément aux articles 7 (1875) et 8 (1921) du Règlement annexé à la Convention du Mètre, la Conférence procède, au scrutin secret, au renouvellement par moitié du Comité international. Les membres sortants sont d'abord ceux qui, en cas de vacances, ont été élus provisoirement dans l'intervalle de deux sessions de la Conférence, les autres sont désignés par le sort. Les membres sortants sont rééligibles.

Décembre 1990

*Pour le Comité international des poids et mesures,*  
 Pavillon de Breteuil, F-92312 Sèvres Cedex

*Le Secrétaire,*  
 J. KOVALEVSKY

*Le Président,*  
 D. KIND

## ORDRE DU JOUR DE LA CONFÉRENCE GÉNÉRALE

19<sup>e</sup> Session — 1991

L'ordre du jour provisoire (*voir* p. 14) a été adopté comme  
Ordre du jour définitif.

---

PREMIÈRE SÉANCE  
DE LA 19<sup>e</sup> CONFÉRENCE GÉNÉRALE  
DES POIDS ET MESURES

tenue le lundi 30 septembre 1991, à 10 heures

---

Monsieur Hubert CURIEN, ministre français de la Recherche et de la Technologie, ouvre la séance inaugurale de la Conférence en prononçant l'allocution suivante :

« MONSIEUR LE PRÉSIDENT,

« MESDAMES ET MESSIEURS LES DÉLÉGUÉS,

« Au nom du Gouvernement de la République française, j'ai le grand honneur d'ouvrir cette 19<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures.

« En qualité de ministre de la Recherche c'est un grand plaisir pour moi d'être parmi vous ce matin et d'accueillir d'éminents physiciens et directeurs de laboratoires de recherche et de leur souhaiter un plein succès dans leurs travaux. Mes souhaits de bienvenue vont à toutes les délégations mais particulièrement à la délégation néo-zélandaise qui participe pour la première fois à cette conférence.

« Je voudrais tout d'abord rendre hommage aux travaux des métrologistes et souligner quelques particularités de leurs méthodes.

« Contrairement à ce que trop de gens croient, qui vous voient un peu comme des « conservateurs », avec tout ce que cette image peut avoir de poussiéreux, vous êtes des innovateurs à l'affût de tous les nouveaux développements scientifiques pour en dériver des applications métrologiques.

« Le rapport du président du Comité international en fournit de très bons exemples :

- stabilisation en fréquence des lasers à  $10^{-11}$  pendant plusieurs années ;
- recherches sur les nouvelles horloges : ions refroidis ou pulsars à la milliseconde ;
- utilisation de l'effet Josephson pour la mesure des potentiels électriques et de l'effet Hall quantique pour l'étalonnage des résistances ;
- utilisation des supraconducteurs à haute température.

« Cependant, tout en utilisant ces résultats scientifiques et ces techniques de pointe, vous faites montre d'une très grande prudence et vous résistez à la tentation d'introduire des changements d'unités au fur et à mesure des découvertes. Il en est de même pour le choix des réalisations pratiques : vous ne lâchez un point d'appui que lorsque le nouveau est parfaitement assuré et que le passage peut s'effectuer sans hiatus. Cette prudence est justifiée par la lourde responsabilité que vous portez,

notamment vis-à-vis de vos collègues chercheurs de toutes les autres disciplines qui seraient plongées dans le chaos si l'un des étalons que vous leur fournissez venait à faillir. En tant que scientifique moi-même, j'apprécie pleinement l'importance de cette responsabilité.

« La communauté des utilisateurs se confond de plus en plus avec la communauté de l'industrie. La métrologie de précision prend de plus en plus d'importance dans les applications quotidiennes. Elle est de plus en plus nécessaire dans le tissu industriel actuel. Elle garantit la loyauté des échanges commerciaux et donne un langage commun au sous-traitant et à son donneur d'ordres.

« Vous travaillez dans un esprit de coopération internationale exemplaire, qui ne s'est jamais relâché depuis la signature de la Convention du Mètre ; c'est un des domaines où la solidarité internationale se manifeste avec le plus d'éclat. La mise en commun des connaissances et des expériences est très profitable pour tous, aussi bien les grands États que les Pays dont la taille et les moyens sont limités mais qui ont cependant besoin de métrologie au même titre que les autres. Cette conférence est l'une des manifestations de cette solidarité.

« En utilisant les possibilités que lui offrent les avancées les plus récentes de la physique, la métrologie jette un pont entre la recherche et les applications industrielles ; elle met à la disposition des entreprises les moyens de mesure de très haute précision que requièrent les développements des techniques de pointe (espace et télécommunications par exemple). Elle est aussi un moyen très puissant de rapprocher les différents secteurs scientifiques, comme la physique, la chimie et toutes les autres sciences qui utilisent de plus en plus la mesure et les unités. Les définitions des unités constituent un ciment qui s'introduit dans les sciences et facilitent l'unification.

« Je voudrais, en guise de conclusion, souligner que la maîtrise de la qualité, qui est l'une des préoccupations majeures de l'industrie dans tous les pays, ne peut être atteinte qu'en se fondant sur des mesures sûres et comparables, et que seul le langage universel de la métrologie permet de garantir des progrès réguliers dans le domaine du contrôle de la qualité.

« Par la diffusion, dans des chaînes d'étalonnage des différents États, des décisions que vous prenez, vous influez sur la quasi totalité des mesures effectuées sur notre planète ; votre responsabilité, comme je l'ai déjà souligné, est donc considérable. Je veux par ma présence, aujourd'hui, à l'ouverture de votre Conférence, montrer la pleine conscience qu'a le Gouvernement français, comme les Gouvernements des autres États signataires de la Convention du Mètre, de l'importance de vos travaux. Connaissant votre compétence et l'esprit dans lequel vous conduisez vos travaux, je suis certain que cette conférence aura le succès que je lui souhaite. »

M. D. KIND, président du Comité international des poids et mesures, répond en ces termes :

« MONSIEUR LE MINISTRE,

« C'est avec un plaisir tout particulier que je vous remercie pour les paroles que vous venez de prononcer et l'accueil que vous nous manifestez. Il ne s'agit pas simplement d'une allocution officielle de la part de votre Gouvernement mais de l'accueil chaleureux de quelqu'un qui connaît bien le domaine qui est le nôtre. En

effet, nous devons en partie rester des « conservateurs » car, comme vous l'avez souligné, il convient de ne pas introduire dans les unités ou leur mise en pratique des changements trop fréquents, mais nous devons en même temps être attentifs à toutes les découvertes et aux évolutions techniques modernes. La Convention du Mètre a été signée il y a plus de cent ans. Les organes qui en sont issus ont toujours reçu l'appui et même la protection du Gouvernement français. Nous avons une large dette à l'égard de Votre Pays. Au cours du temps la Convention du Mètre s'est avérée excellente. J'espère qu'au cours des prochains jours elle donnera une fois de plus une preuve de son efficacité. Je vous remercie des vœux de succès que vous avez formulés pour nos travaux. »

M. le Professeur J. HAMBURGER, président de l'Académie des Sciences de Paris et président de la Conférence, prononce l'allocution suivante :

« MONSIEUR LE MINISTRE,

« MESDAMES, MESSIEURS,

« C'est un grand honneur pour le président de l'Académie des Sciences que de prononcer une introduction à vos séances de travail. Quand ce président n'a consacré ses recherches qu'aux choses de la vie, il n'est guère habilité à parler de poids et mesures. Et pourtant c'est avec le corps de l'homme que tout a commencé. Les Grecs mesuraient les petites longueurs en doigts, en pouces, en pieds et en pas. La *palaiste* était la largeur de la main, le *spithamê* le plus grand écart entre pouce et petit doigt et l'*orguia* la distance d'une extrémité à l'autre des bras écartés. Parodiant la célèbre sentence du sophiste grec Protagoras, on peut dire que l'homme était la mesure de toutes choses. Et pourtant l'étude de l'homme fut bien la dernière à profiter du concept de mesure. La biologie et la médecine ignoraient la mesure, elles demeurèrent presque entièrement qualitatives jusqu'au siècle dernier. On savait que le sang contenait des globules rouges, mais il fallut attendre 1855 pour que l'Autrichien Cramer s'avisât qu'on ferait bien de les compter. Et ce n'est guère avant les années 1900 que l'on comprit l'intérêt d'un dosage précis des molécules qui composent notre corps. Les peseurs et mesureurs que vous êtes, et qui font depuis si longtemps et dans tant de domaines un si excellent travail, n'ont contaminé les biologistes et les médecins que dans les dernières dizaines d'années.

« Mais cette contamination a eu de foudroyants effets. Comme le Prince charmant éveillant la Belle au bois dormant, assoupie depuis des siècles, la mesure a tiré la biologie et la médecine du sommeil et les a métamorphosées. J'aimerais vous conter une ou deux histoires qui font apparaître les merveilles de cette métamorphose.

« Il était une fois un jeune Hollandais, nommé Willem Kolff, qui terminait ses études de médecine quand la dernière guerre éclata. Willem alla travailler dans une très vieille ville de vingt mille habitants, Kampen, située derrière les régions profondes du Zuyderzee que les Hollandais ont conquis sur la mer pour y faire naître des polders fertiles. Dans l'hôpital où il était affecté, la vie n'était guère active sous l'occupation et Willem avait tout le temps de rêver. Il se souvint d'un problème qui angoissait les médecins depuis plus d'un siècle, le problème de l'urémie. On savait que la défaillance rénale provoquait un envahissement de l'organisme par l'urée, que les reins n'éliminaient plus, et que bien des malades mouraient ainsi après une longue et effroyable agonie. Lui-même avait à soigner un fermier urémique, presque aveugle, souffrant de maux de tête continuels, secoué sans cesse par de pénibles vomissements.

L'idée vint à notre jeune médecin qu'il suffirait peut-être de soustraire un peu de l'urée qui empoisonnait le sang du fermier pour que celui-ci soit soulagé. Il avait lu les travaux de trois Américains, Abel, Rowntree et Turner, qui avaient réussi à extraire l'urée du sang de quelques lapins en faisant passer ce sang dans des tubes de collodion plongés dans une solution saline, l'urée diffusant à travers la paroi des tubes pour s'échapper vers la solution saline. Cette dialyse de l'urée, ne pouvait-on l'appliquer à l'homme urémique? Kolff se dit qu'il fallait tenter de construire sur ce principe un rein artificiel.

« Il alla trouver le directeur d'une petite usine de la ville, que la guerre et l'occupation avait mise en demi-sommeil, et ses ouvriers, qui avaient des loisirs forcés, les occupèrent avec enthousiasme à fabriquer une énorme machine, où le sang prélevé dans une veine pouvait circuler dans vingt mètres d'un tube de cellophane plongé dans une solution d'eau salée. La machine fut essayée sur 15 malades urémiques. Kolff vit avec joie qu'on pouvait ainsi extraire beaucoup d'urée et que le taux d'urée du sang diminuait fortement. Hélas, son contentement ne dura pas longtemps, car l'état des urémiques ne s'améliora guère et finalement tous moururent. Des tentatives analogues faites aux États-Unis et en Suède connurent le même échec.

« C'est alors que des mesures plus exactes et plus complètes donnèrent la clé de cet insuccès. L'esprit quantitatif allait montrer tout son pouvoir.

« Comme la suite de cette histoire se déroula en grande partie à Paris, dans l'unité de recherche que je dirigeais alors à l'Hôpital Necker, je m'en souviens dans le plus grand détail. On ne se borna plus au dosage de l'urée du sang pour analyser la situation de ces urémiques. On soumit à des mesures répétées presque tous les éléments chimiques que le sang contient. Et on s'aperçut que la défaillance des reins provoquait bien d'autres déséquilibres que la seule accumulation d'urée. Il apparut que le rein n'était nullement un simple appareil à éliminer d'indésirables déchets, tels que l'urée. Sa responsabilité est beaucoup plus étendue. Elle n'est rien moins que le maintien d'une composition chimique de l'organisme rigoureusement constante, ou en tout cas restant dans la marge étroite de variations compatibles avec la vie harmonieuse de notre corps. Voilà ce que révélait notamment la mesure du sodium, du potassium, du magnésium, du calcium, du chlore, des phosphates, des sulfates et de l'eau du corps. Voilà qui expliquait l'échec des premiers reins artificiels. À partir du moment où on sut qu'il fallait mettre sous surveillance ces divers éléments chez l'urémique, la victoire fut immédiatement acquise. Dans la première statistique que nous publiâmes alors, nous pûmes faire état de 93 % de succès de la dialyse par le rein artificiel, avec guérison complète, dans 150 cas d'urémie aiguë. Bientôt, de la même façon, on put maîtriser l'urémie chronique et permettre une vie quasi-normale à des hommes et des femmes dont les deux reins avaient totalement cessé leur fonction ou même avaient été enlevés par le chirurgien. C'était, me semble-t-il, le triomphe des poids et mesures du corps humain.

« Voici maintenant un blessé dont les deux jambes ont été ensevelies sous un monceau de ferraille. Il a fallu des heures avant qu'on puisse dégager les membres écrasés, qui apparaissent alors livides, gonflés, insensibles, froids. Le blessé est amené à l'hôpital dans un état de choc extrême, le pouls est faible, la pression artérielle effondrée. Presque toujours, après ce grand traumatisme, les organes vont perdre provisoirement pendant des jours et des jours leur pouvoir régulateur des fonctions essentielles de l'organisme. Le blessé pourrait échapper à la mort si ces jours dangereux étaient traversés sans encombre. Mais pour attendre ce temps de la guérison possible, il y aura deux, trois ou quatre longues semaines à passer durant lesquelles, à chaque

instant, s'accumuleront les menaces mortelles. Comme un navire à la dérive, l'organisme privé de ses systèmes d'équilibre serait à la merci des plus dangereux accidents, si l'équipe médicale ne prenait, pendant toute la période critique, le relais des régulations défaillantes.

« L'entreprise est fondée sur la mesure, une ou plusieurs fois par jour, d'une liste de valeurs prédéterminées : seront ainsi régulièrement estimées dans le sang, fidèle reflet des liquides qui forment le milieu intérieur, les concentrations de l'oxygène, du gaz carbonique, de l'urée, du sodium, du chlore, du potassium, des bicarbonates, du calcium, du glucose, des ions hydrogène et des dix autres valeurs dont l'expérience a montré qu'elles ne pouvaient s'écarter sans danger de certaines limites reconnues. En même temps sont mesurées et suivies les diverses éliminations corporelles, la pression du sang dans les artères et dans les veines, les constantes qui dénoncent le risque d'hémorragie ou à l'inverse de coagulation excessive du sang dans les vaisseaux. Pardonnez-moi de ne pas entrer dans de plus grands détails. Sans doute suffit-il de dire que le résultat de ces mesures doit être obtenu rapidement, si bien que les laboratoires de chimie ont dû renouveler leurs méthodes pour fournir des réponses quasi immédiates. En outre la masse de ces informations quantitatives doit être classée et enregistrée sur une sorte de tableau de bord, que notre équipe a, je crois, mis au point la première, mais qui est maintenant utilisé dans tous les centres de réanimation. Car ce que je viens de décrire, c'est ce que, dans les années 1950, j'ai proposé de nommer la « réanimation médicale » et ce que les médecins anglophones appellent « intensive care ».

« Dès que les mesures sous surveillance révèlent quelque déviation inquiétante par rapport aux valeurs normales, l'action correctrice est mise en jeu. Des perfusions sanguines convenables, des appareils de respiration artificielle, des sondes cardiaques de stimulation électrique rythmée, divers modèles de rein artificiel, sans compter un jeu de médicaments puissants et divers, permettent aujourd'hui de ramener à la normale la plupart des valeurs que l'accident ou la maladie a perturbées.

« Et les résultats sont, dans l'ensemble, remarquables. Il y a quelques années, notre blessé aux membres ensevelis n'avait guère de chance d'échapper à la mort. Aujourd'hui la guérison est habituelle. De la même façon, cent autres maladies, mortelles il y a vingt ans, guérissent presque toujours maintenant et, qui plus est, guérissent avec une sécurité plus grande. Il a suffi de prendre en main le contrôle de quelques dizaines de données chimiques et physiques de l'organisme malade pour préserver celui-ci des déséquilibres mortels. Une fois encore, c'est le triomphe des poids et mesures du corps.

« Ainsi l'histoire de la biologie et de la médecine vérifie la règle générale : la discipline à laquelle vous vous attachez, la mesure des choses, est le grand fécondateur de la science. Peut-être même celui qui cherche une définition de la science pourrait la trouver dans votre approche du monde. Il n'est de science que quantitative. L'homme ne connaît le monde qu'à travers l'empreinte qu'il lui imprime. Et cette empreinte, en large partie, est faite de poids et de mesures.

« Vous allez, pendant quatre jours, affiner encore cet art qui est le vôtre. Au nom de l'Académie des Sciences je forme pour votre travail les vœux les plus chaleureux. »

\*  
\* \*

Après une interruption d'environ vingt minutes, la Conférence reprend ses travaux sous la présidence de M. A. MARÉCHAL, membre de l'Académie des Sciences de Paris et ancien membre du Comité international des poids et mesures, M. le Professeur J. HAMBURGER étant retenu par ailleurs.

2, 3, 4. Sur proposition de M. MARÉCHAL, la 19<sup>e</sup> Conférence générale désigne par applaudissements M. J. KOVALEVSKY, secrétaire du CIPM, comme secrétaire de la Conférence.

Les titres accreditant les délégués ayant été remis au préalable, le Secrétaire procède à l'établissement de la liste des délégués chargés de vote, par État. Cette liste s'établit comme suit :

Allemagne .....	MM.	S. GERMAN
Amérique (États-Unis d') .....		J. W. LYONS
Argentine (Rép.) .....		R. STEINBERG
Australie .....		W. R. BLEVIN
Autriche .....		R. GALLE
Belgique .....		H. VOORHOFF
Brésil .....		G. MOSCATI
Bulgarie .....		V. GAVRAILOV
Canada .....		J. VANIER
Chine (Rép. populaire de) .....		Bai Jingzhong
Corée (Rép. de) .....		Seung-Duk PARK
Danemark .....		H. H. JENSEN
Égypte .....		M. M. AMMAR
Espagne .....		J. A. FERNANDEZ HERCE
Finlande .....	Mme	U. LÄHTEENMÄKI
France .....	MM.	J. BLOUET
Hongrie .....		D. BELEDI
Inde .....	Mme	S. SINGH
Indonésie .....	MM.	G. M. PUTERA
Irlande .....		J. LAWTON
Israël .....		A. SHENHAR
Italie .....		M. MURGO
Japon .....		S. HATTORI
Mexique .....		A. PORTAL ARIOSA
Norvège .....		K. BIRKELAND
Nouvelle-Zélande .....		A. C. CORNEY
Pays-Bas .....		G. J. FABER
Pologne .....		Z. REFEROWSKI
Portugal .....		M. VICENTE
Roumanie .....		N. DRĂGULĂNESCU
Royaume-Uni .....		P. B. CLAPHAM
Suède .....		K. SIEGBAHN
Suisse .....		B. VAUCHER
Tchécoslovaquie .....		V. SULÍK

Thaïlande .....	P. THENANONTA
Turquie .....	A. EREN
URSS .....	V. I. POUSTOVOIT
Yougoslavie .....	M. EŽOV

Sur les quarante-sept États signataires de la Convention du Mètre, trente-huit sont représentés.

### 5. Approbation de l'ordre du jour

L'ordre du jour provisoire proposé dans la Convocation est adopté avec un changement concernant le point 18 (Renouvellement par moitié du Comité international) qui sera traité directement après le point 14.

6. Le PRÉSIDENT donne la parole à M. KIND, président du CIPM, pour la présentation de son rapport.

#### **Rapport du président du Comité international sur les travaux accomplis depuis la 18<sup>e</sup> Conférence générale (octobre 1987 — septembre 1991)**

Conformément à l'article 7 du Règlement annexé à la Convention du Mètre, j'ai le plaisir, en tant que président du Comité international des poids et mesures, de présenter à la 19<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures mon rapport sur les travaux accomplis depuis la 18<sup>e</sup> Conférence générale. Ce rapport couvre donc les quatre années qui se sont écoulées depuis le mois d'octobre 1987.

Cette période a été très active pour le Comité international, pour ses comités consultatifs et pour le Bureau international des poids et mesures (BIPM). Le 1<sup>er</sup> janvier 1990 l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90) est entrée en vigueur ; elle a remplacé l'Échelle internationale pratique de température de 1968 (EIP-68) ainsi que l'Échelle provisoire de température de 1976 entre 0,5 K et 30 K (EPT-76). L'EIT-90 a été adoptée par le CIPM en septembre 1989 sur proposition de son Comité consultatif de thermométrie (CCT). J'attire votre attention sur le projet de résolution C qui concerne l'EIT-90 et les travaux futurs en thermométrie. À cette même date du 1<sup>er</sup> janvier 1990 sont entrées en vigueur les valeurs attribuées par convention aux constantes de Josephson et de von Klitzing,  $K_{J,90}$  et  $R_{K,90}$ , valeurs à utiliser dans les représentations pratiques du volt et de l'ohm. Ces valeurs ont été adoptées par le CIPM en octobre 1988 sur recommandation de son Comité consultatif d'électricité (CCE) et leur entrée en application a conduit à améliorer de façon notable la cohérence et l'exactitude des mesures en électricité dans le monde entier. J'attire ici votre attention sur le projet de résolution B qui concerne l'effet Josephson et l'effet Hall quantique. Dans ces deux domaines le BIPM a joué un rôle important, en premier lieu lors des discussions scientifiques qui ont conduit le CIPM à prendre des décisions sur ces sujets et en second lieu lors de la préparation des documents techniques détaillés qui se sont avérés nécessaires pour la mise en pratique ultérieure. Une fois de plus cela renforce l'opinion du Comité international selon laquelle la présence au BIPM d'un personnel scientifique très qualifié et expérimenté constitue un moyen rentable de coordonner et de faire progresser la métrologie mondiale.

Pendant cette même période on a mis en œuvre les décisions du CIPM et de la 18<sup>e</sup> Conférence générale concernant la prise en charge par le BIPM de la responsabilité du Temps atomique international (TAI). Le 1<sup>er</sup> janvier 1988 le Bureau international de l'heure a officiellement cessé d'exister. La responsabilité qu'il avait des observations de la rotation de la Terre a été confiée à un Service international de la rotation terrestre créé à cet effet et la responsabilité du TAI est échue au BIPM. À cette date le BIPM établissait déjà le TAI et en assurait la diffusion, ainsi que celle de UTC, à la suite de la venue au Pavillon de Breteuil, en 1985, de cette section qui jusqu'alors se trouvait à l'Observatoire de Paris. Ce qui était imprévisible, à l'époque où furent préparées les décisions du CIPM et de la 18<sup>e</sup> Conférence générale, c'est l'accroissement important de la charge de travail que constitue l'établissement de l'échelle mondiale de temps, par suite des améliorations spectaculaires apportées par l'utilisation du Global Positioning System (GPS) pour les comparaisons de temps. L'amélioration d'exactitude, d'un à deux ordres de grandeur, dans les possibilités de comparer les horloges de façon courante, a conduit le Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS) à formuler, en 1989, un certain nombre de recommandations. Certaines concernent les étalons de temps et les comparaisons de temps et j'attire ici votre attention sur le projet de résolution A ; d'autres recommandations spécifient de nouvelles tâches que le CCDS souhaite voir entreprendre au BIPM. Il convient entre autres de mentionner l'installation au BIPM de quelques horloges atomiques commerciales pour permettre à celui-ci de se tenir au courant de la pratique expérimentale et des techniques de comparaison de temps. Il est considéré comme essentiel qu'un groupe chargé de coordonner et d'évaluer les résultats de comparaisons horaires entre laboratoires qui contribuent au TAI, possède ces connaissances pratiques. Toutefois, il est recommandé que les résultats de la station horaire du BIPM n'entrent pas dans le calcul du TAI afin de conserver toute l'indépendance souhaitable entre l'établissement de l'échelle et l'évaluation de son fonctionnement. La demande présentée d'un accroissement d'environ 3 % du budget pour couvrir le coût d'installation et l'entretien à long terme de la station horaire du BIPM, dont le détail est donné dans le document de Convocation de la Conférence, est fondée sur les avis exprimés par le CCDS et par son Groupe de travail sur le TAI. Les progrès en cours dans les laboratoires nationaux et les universités sur les étalons de fréquence récents, fondés sur des atomes ou des ions piégés ou ralentis, laissent penser que l'on pourra disposer d'étalons de fréquence et d'horloges dont l'exactitude sera considérablement supérieure à celle des meilleurs étalons actuels. Si effectivement l'on dispose de ces étalons améliorés, non seulement leur comparaison constituera un énorme défi technique mais l'application des diverses corrections, que l'on apporte maintenant sans trop de difficulté, exigera un niveau plus profond de compréhension des théories de la relativité et de la mécanique quantique. Il ne fait aucun doute, toutefois, que la possibilité d'effectuer des comparaisons de temps encore plus précises, et des mesures de positionnement correspondantes couvrant la totalité de la surface du globe, sera utilisée à des fins scientifiques et industrielles comme l'ont été les possibilités offertes par le GPS. Cela met en lumière deux des caractéristiques de la métrologie moderne : la première est que beaucoup de travaux se situent aux limites des connaissances en physique et la seconde est que les applications pratiques des techniques de pointe les suivent de très près. Les techniques de pointe actuelles se fondent encore bien plus que par le passé sur des mesures exactes. Il appartient aux organes de la Convention du Mètre de faire constamment tout ce qui est en leur pouvoir pour assurer que le système qui se trouve à la base de la métrologie mondiale soit en mesure de satisfaire les demandes pratiques de la science et de l'industrie.

Les mesures de temps, qui sont l'activité la plus récente du BIPM, se développent rapidement, mais des changements interviennent aussi dans les domaines plus anciens, comme celui de la mesure des masses avec la conservation et la diffusion de son unité, le kilogramme. À la 18<sup>e</sup> Conférence générale il avait été question d'une vérification générale des prototypes nationaux du kilogramme. Dans sa Résolution 1, il était demandé aux laboratoires nationaux de se préparer à envoyer au BIPM leur prototype national. En 1989, la vérification (la troisième depuis la distribution des prototypes à la première Conférence générale, en 1889) a commencé par la comparaison du prototype international avec ses témoins et avec les étalons d'usage courant du BIPM. Ces comparaisons (ainsi que toutes celles de cette troisième vérification) ont été faites à l'aide de la balance NBS-2, dont la répétabilité est maintenant d'environ 1 µg. Les résultats, qui seront exposés avec plus de détails par le président du Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM), ont fait apparaître des variations significatives de la masse dans les mois qui suivent le nettoyage-lavage. On constate ces variations non seulement sur la masse du prototype international mais aussi sur la masse des autres prototypes en platine iridié. Le CIPM et ultérieurement un groupe de travail du CCM ont discuté des conséquences que cette constatation pouvait avoir pour la troisième vérification. Une quarantaine de prototypes nationaux ont été envoyés au BIPM pour prendre part à cette vérification et les mesures sont maintenant terminées pour la moitié d'entre eux. Cette vérification s'avère une expérience particulièrement importante car elle intervient à un moment où apparaissent des améliorations significatives dans le fonctionnement des balances tant au BIPM que chez les constructeurs de balances commerciales. Des recherches sont en cours au BIPM et dans les laboratoires nationaux afin de comprendre les processus qui affectent la surface des étalons de masse et qui entraînent des variations de la masse. La plupart de ces recherches ont été stimulées par l'observation, faite au BIPM, des variations que l'on a constatées sur la masse du prototype international après nettoyage.

Chercher un moyen pratique de définir l'unité de masse en fonction de constantes atomiques fondamentales ou d'un effet quantique macroscopique, cela n'est pas un problème nouveau. Ce qui est peut-être nouveau c'est qu'il soit effectivement possible d'arriver à une définition de ce type. Beaucoup d'intérêt est actuellement porté aux expériences qui permettent de comparer avec exactitude une force gravitationnelle et une force électromagnétique. En principe de telles expériences devraient conduire à mesurer une masse en fonction de constantes fondamentales au moyen de l'effet Josephson et de l'effet Hall quantique. D'autres expériences sont en cours dans lesquelles la masse d'un monocristal macroscopique de silicium est évaluée en fonction du nombre et de la masse des atomes individuels de silicium qu'il contient. Bien qu'aucune de ces méthodes n'ait encore atteint un niveau tel qu'on puisse envisager sérieusement de changer la définition de l'unité de masse, l'éventualité que ce stade soit atteint dans un avenir prévisible n'est pas à écarter.

À côté de ces activités qui sont liées aux unités de base du SI, le CIPM a, par l'intermédiaire de son Comité consultatif d'électricité et de son Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR), entrepris de nouveaux travaux dans le domaine de la métrologie des fibres optiques. Il est maintenant important pour les industries qui s'occupent d'électro-optique de pouvoir mesurer la puissance qui entre et qui sort sur une ligne de transmission en fibre optique. Il sera rendu compte de ces travaux dans le rapport du président du CCPR. Je reviendrai plus loin sur certaines autres activités de ces comités consultatifs et le président de chaque comité consultatif présentera son propre rapport au cours de la Conférence.

Le CIPM a également étudié la possibilité d'avoir une certaine action liée à la métrologie dans le domaine de la chimie et de la physico-chimie. Lors de la session qu'il a tenue en septembre 1990 le Comité international a créé un groupe de travail *ad hoc* et l'a chargé de faire une étude préliminaire portant sur les besoins de traçabilité pour les mesures de ce type et de donner un avis sur la possibilité pour le CIPM d'avoir une action utile dans le domaine. Le groupe de travail *ad hoc* s'est réuni le 4 et le 5 juin 1991 au National Institute of Standards and Technology (Washington) sous la présidence de M. J. Lyons et a présenté un rapport au CIPM lors de sa réunion de 1991. Le CIPM a décidé que ce groupe de travail *ad hoc* s'appellerait *Groupe de travail sur la métrologie en chimie* et qu'il entreprendrait quelques comparaisons internationales entre laboratoires nationaux, en collaboration avec des spécialistes provenant d'autres laboratoires et d'organismes internationaux compétents. Ce programme de comparaisons internationales sera limité à quelques méthodes de référence couramment employées pour un petit nombre de matériaux de référence primordiaux. L'idée est de déterminer sur un programme ainsi restreint si l'amélioration de la traçabilité peut être étendue à un éventail plus large de méthodes et de matériaux.

Des modifications importantes sont intervenues dans la pratique de la métrologie et l'établissement des lignes de traçabilité par suite de la facilité accrue avec laquelle on peut obtenir et mettre en œuvre des installations fondées sur l'effet Josephson ou l'effet Hall quantique. Il n'est pas rare maintenant que des firmes industrielles disposent de leurs propres représentations du volt et de l'ohm fondées sur ces deux effets quantiques macroscopiques. Dans ces conditions la chaîne hiérarchique traditionnelle allant du laboratoire national (et même du BIPM) jusqu'à l'utilisateur n'existe plus. Il s'ensuit que le rôle du laboratoire national et du BIPM dans ces domaines est différent de ce qu'il était dans le passé. Les installations fondées sur des effets quantiques macroscopiques sont beaucoup plus stables et reproductibles que tout étalon de transfert existant. Les comparaisons qui permettent de contrôler efficacement ces installations ne peuvent se faire que par transport d'appareils complets. Cela a déjà été fait pour des installations Josephson et l'on disposera prochainement des résultats des comparaisons effectuées par le BIPM au NIST, au NPL, au NRC et à la PTB. L'une des conséquences est que les comparaisons de piles Weston, qui étaient autrefois effectuées à intervalle régulier, ne sont plus nécessaires. Le problème se pose de la même façon pour les comparaisons de résistances étalons. Dans ces domaines le rôle du BIPM consiste donc maintenant à conserver une installation à effet Josephson et une installation à effet Hall quantique comme bases de ses services d'étalonnage et à effectuer des comparaisons directes occasionnelles d'installations à effet Josephson. Il est vraisemblable que des comparaisons directes d'installations à effet Hall quantique auront lieu dans les prochaines années. Il ne faut pas oublier que, bien que personne ne conteste la stabilité ou l'universalité des constantes  $2e/h$  ou  $h/e^2$ , la réalisation pratique d'installations complètes destinées à produire 1 V, 10 V ou 12 000  $\Omega$  constitue une tâche d'une complexité considérable et, sans au moins un contrôle indépendant, ne peut être considérée comme fiable au niveau le plus élevé d'exactitude.

Cela m'amène à ce qui s'est fait au BIPM. À l'époque de la 18<sup>e</sup> Conférence générale je vous ai fait part de l'avancement de la construction d'un nouveau bâtiment destiné à une bibliothèque et à des bureaux. Ce bâtiment, que nous appelons le Nouveau Pavillon, a été inauguré à l'occasion de la 77<sup>e</sup> session du CIPM, en octobre 1988, et depuis lors il a donné entière satisfaction. J'espère que vous le visiterez mardi après-midi lors de la visite des laboratoires et autres installations du BIPM

prévue pour les délégués à la Conférence générale. Ce bâtiment a permis d'aménager une bibliothèque convenable et de donner un peu d'espace pour l'administration et le secrétariat qui étaient jusqu'ici très à l'étroit.

Lors de la 17<sup>e</sup> Conférence générale mon prédécesseur à la présidence du Comité international a présenté un plan de construction au BIPM qui avait été préparé par le Comité international en 1980. Depuis lors deux des bâtiments prévus ont été achevés, le premier inauguré en 1984 abrite essentiellement les laboratoires et les bureaux de la partie de la section des longueurs qui travaille sur les lasers et le second est, bien évidemment, le Nouveau Pavillon. Cela amène à huit le nombre total des bâtiments du BIPM. Ceux-ci comprennent le Pavillon de Breteuil lui-même, construit à l'origine en 1672 pour Monsieur, frère de Louis XIV, sur les plans de Gobert, architecte du Roi, le Petit Pavillon qui date du début du XVIII<sup>e</sup> siècle, l'Observatoire érigé en 1878 et qui fut la première construction du Comité international, le Nouvel Observatoire qui est une extension de l'Observatoire et qui fut achevé en 1929, les deux bâtiments construits au début des années 1960 pour abriter la section des rayonnements ionisants qui venait d'être créée et enfin les deux bâtiments déjà mentionnés construits dans les années 1980.

En dépit des grands progrès effectués lors de la dernière décennie, non seulement grâce à la construction de nouveaux bâtiments mais aussi grâce aux améliorations apportées aux bâtiments existants, il n'en demeure pas moins un besoin réel de disposer de davantage d'espace pour l'atelier de mécanique. Bien que le Comité international n'estime pas être en mesure actuellement de faire des propositions pour de nouvelles constructions, il est prévu de rassembler les activités de l'atelier de mécanique au rez-de-chaussée du bâtiment principal des rayonnements ionisants. Il existe déjà un petit atelier de mécanique à cet endroit et on estime qu'il est possible de trouver de la place en utilisant de façon plus efficace d'autres parties du bâtiment.

En 1990 après le transfert de la quasi totalité des livres dans la nouvelle bibliothèque, un important réaménagement a été effectué dans l'une des salles du Nouvel Observatoire et on a installé de nouveaux laboratoires pour la section d'électricité. Il reste un gros effort à faire pour moderniser la climatisation de certaines salles de laboratoire de l'Observatoire. Au cours de la période de 1993 à 1996 des sommes importantes devront y être affectées, car il s'agit d'un service essentiel pour des laboratoires consacrés à la métrologie de haut niveau.

Les toutes dernières années ont vu un abaissement notable de la moyenne d'âge du personnel du BIPM. Cela est dû au départ en retraite d'un certain nombre de personnes qui ont consacré de longues années, dans certains cas jusqu'à cinquante ans, au service de la métrologie au BIPM. L'âge moyen de l'ensemble du personnel est maintenant de 48 ans et celui du personnel scientifique est également de 48 ans, alors qu'il avait atteint un maximum de 53 ans en 1985. L'âge moyen du personnel scientifique continuera à diminuer nettement dans les quatre années comprises entre 1993 et 1996, par suite de nouveaux départs en retraite.

Au 1<sup>er</sup> janvier 1991 la propriété [du copyright] de *Metrologia* est passée de Springer-Verlag au BIPM. Lorsque *Metrologia* a commencé à paraître en 1965, sous les auspices du CIPM, un accord avait été passé avec Springer-Verlag pour partager les tâches de publication. De 1965 à 1980 le travail d'édition a été fait au NRC (Ottawa) et depuis 1982 il a été fait au BIPM mais la publication elle-même restait l'affaire de Springer-Verlag. En 1989 le CIPM en est venu à la conclusion que l'avenir de *Metrologia* serait mieux assuré si le BIPM prenait la responsabilité de la publication

aussi bien que celle de l'édition de la revue. Le transfert a été conclu après des négociations entre le directeur du BIPM et Springer-Verlag. Je voudrais exprimer ici à la direction de Springer-Verlag, en premier lieu, mon appréciation pour les vingt-cinq ans de coopération excellente et, en second lieu, pour son attitude constructive et positive lors du transfert.

Le premier numéro du nouveau *Metrologia*, qui conserve la politique éditoriale originelle pour ce qui est de la haute qualité de ses articles scientifiques, est le numéro 1 du volume 28 ; il est paru en février 1991. Comme vous pourrez le voir nous essayons d'élargir le public des lecteurs de notre revue en publiant parfois des comptes rendus de conférences et des numéros spéciaux en plus des quatre numéros annuels qui comportent, de temps à autre, des nouvelles provenant des laboratoires et d'autres organisations. J'invite tous les délégués à la Conférence générale à saisir toutes les occasions de promouvoir *Metrologia* car, à tous égards, cette revue est nôtre.

En liaison avec l'OIML, l'ISO et la CEI, le BIPM travaille à la deuxième édition du *Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie* et, sous les auspices de l'ISO, à un nouveau document sur l'expression des incertitudes de mesure. Ce second document est extrêmement important car il répond à un problème commun à tous les aspects et tous les niveaux de la métrologie. Il sera fondé sur les principes adoptés par le CIPM en 1980 et devrait conduire à une harmonisation mondiale des pratiques dans ce domaine difficile et souvent litigieux.

J'en viens maintenant aux activités des comités consultatifs. Depuis la dernière Conférence générale il y a eu huit réunions de comités consultatifs : deux sessions du Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM) et une session du Comité consultatif d'électricité (CCE), du Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS), du Comité consultatif de thermométrie (CCT), du Comité consultatif des unités (CCU), du Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR) et du Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants (CCEMRI). De plus, les trois sections du CCEMRI se sont réunies deux fois, un groupe de travail commun au CCE et au CCPR s'est réuni pour étudier les problèmes spécifiques soulevés par la métrologie des fibres optiques, divers groupes de travail du CCT se sont réunis à plusieurs reprises pour préparer le texte de l'EIT-90 et de ses deux documents complémentaires ; enfin, les groupes de travail du CCM sur la masse, les forces et les pressions se sont réunis une ou deux fois.

Bien que le président de chaque comité consultatif présente un rapport détaillé des activités de son comité je tiens à faire cependant quelques remarques sur chacun de ces comités. Le Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM) ne s'est pas réuni depuis l'adoption de la nouvelle définition du mètre en 1983 mais une réunion est prévue pour 1992. Lors de sa session de mai 1991, le CCM a examiné l'état d'avancement de la troisième vérification des prototypes nationaux du kilogramme et a reçu les rapports de ses groupes de travail sur les forces et les pressions. Il a aussi parlé des expériences, mentionnées au début de mon rapport, qui risquent un jour de conduire à des discussions en vue d'une nouvelle définition du kilogramme. Le CCDS et son Groupe de travail sur le TAI ont présenté d'importantes recommandations au CIPM, non seulement au sujet des travaux effectués au BIPM mais aussi sur des aspects plus généraux de la métrologie du temps, résultant des récentes améliorations de l'exactitude des comparaisons d'horloges apportées par l'emploi du GPS. Le CCPR a passé en revue les progrès effectués en radiométrie absolue et en spectroradiométrie. Il a prévu de nouvelles comparaisons internationales destinées à étudier de nouvelles

méthodes. À côté des recherches en radiométrie des fibres optiques, le CCPR a passé en revue les progrès faits en radiométrie avec les anneaux de stockage d'électrons. Une comparaison internationale de radiomètres cryogéniques absolus est également envisagée. J'ai déjà mentionné les travaux du CCE et du CCT mais j'aimerais attirer votre attention sur le plein succès avec lequel ces deux comités consultatifs ont fait appel à des petits groupes de travail *ad hoc*. Ces groupes rassemblaient des spécialistes, éminents dans leur domaine et de renommée mondiale, qui furent en mesure de parvenir à un accord pour résoudre des problèmes sur lesquels parfois s'exprimaient au départ des opinions nettement divergentes et même opposées. J'ai déjà parlé du rôle du BIPM en la matière, mais je dois aussi remercier tous ceux qui, dans les laboratoires nationaux, ont apporté leur contribution au succès de la tâche. Le Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants (CCEMRI) poursuit ses travaux dans le domaine de la radioactivité, des rayons X, du rayonnement  $\gamma$  et des neutrons dans le cadre des trois sections qu'il comporte. De nombreuses comparaisons internationales sont organisées : certaines ont lieu au BIPM, d'autres se déroulent dans les laboratoires nationaux qui possèdent des installations et des ressources dont le BIPM ne dispose pas. Les toutes dernières réunions du CCEMRI et de ses trois sections ont été organisées afin de se dérouler durant la même semaine au BIPM. Certains experts indépendants ont été invités à la réunion du CCEMRI. Le Comité consultatif des unités (CCU) a adopté, lors de sa session de 1990, des propositions, qui font l'objet du projet de résolution D soumis à la Conférence générale, pour étendre la liste des préfixes SI. Il a aussi étudié les propositions de modifications à apporter à la brochure sur le SI à la suite de l'introduction de l'EIT-90 et des décisions prises par le CIPM au sujet de l'effet Josephson et de l'effet Hall quantique. La 6<sup>e</sup> édition de la brochure sur le SI comportant ces modifications est parue.

J'en viens maintenant à la composition du Comité international et aux nouvelles des membres honoraires de ce Comité. C'est avec une profonde tristesse que nous avons appris le décès, survenu le 23 décembre 1990, de J. Stulla-Götz, membre honoraire, qui a siégé au Comité international de 1954 à 1977. J. Stulla-Götz s'est particulièrement distingué par sa participation au Comité consultatif pour la définition du mètre et au Comité consultatif des unités. Il prit une part active aux travaux qui ont abouti à la création du Système international d'unités. Par ailleurs, comme il fut longtemps aussi président du Comité international de métrologie légale, il fut ainsi à l'origine des excellentes relations que les organes de la Convention du Mètre entretiennent avec l'OIML.

Durant les quatre années qui se sont écoulées depuis la dernière Conférence générale quatre membres du Comité international ont donné leur démission : ce sont MM. Ambler, Dean, Mekhannikov et Mitra. En reconnaissance des éminents services qu'il a rendus au Comité et de son dynamisme à la présidence du CCEMRI et du CCE, E. Ambler a été élu membre honoraire.

Ces démissions ont conduit à l'élection par cooptation de MM. P. B. Clapham, S. K. Joshi, J. W. Lyons et V. I. Poustovoit. Conformément à l'article 8 (1921) du Règlement annexé à la Convention du Mètre, ces élections provisoires sont maintenant soumises à la Conférence générale. Les noms de cinq autres membres du CIPM ont été tirés au sort pour porter à neuf le nombre total des membres dont l'élection ou la réélection sera proposée à la présente Conférence générale.

En octobre 1989, Jan de Boer a fait part au Comité international de son intention d'abandonner la lourde responsabilité de secrétaire du Comité, tâche qu'il a assumée

depuis 1962. Au cours des 27 années que cela représente, il a assuré la charge de secrétaire lors de six Conférences générales, il a supervisé d'importants changements au sein du BIPM et il a soutenu avec fermeté et conseillé avec sagesse trois directeurs du BIPM. En acceptant qu'il abandonne cette charge le Comité rend hommage au grand talent avec lequel il a mené à bien toutes ces tâches et le remercie tout particulièrement au nom des Pays membres de la Convention du Mètre.

J'en viens maintenant au rapport que le directeur du BIPM a préparé sur les travaux accomplis dans les laboratoires du BIPM depuis la 18<sup>e</sup> Conférence générale, c'est-à-dire depuis octobre 1987.

### *Longueurs*

*Lasers.* — Au cours des quatre années qui se sont écoulées depuis la 18<sup>e</sup> Conférence générale le nombre des comparaisons internationales de fréquence de lasers effectuées au BIPM ou avec sa participation a été nettement plus élevé qu'au cours de la période précédente. Cela reflète en partie la nécessité croissante d'avoir une reconnaissance de la traçabilité des mesures sur le plan international, mais cela provient aussi du fait qu'un plus grand nombre de Pays membres de la Convention du Mètre fondent maintenant leurs étalons nationaux de longueur sur des lasers asservis. La plupart de ces comparaisons ont été effectuées au BIPM, en particulier celles auxquelles ont pris part l'Afrique du Sud, la Belgique, la République de Corée, la France, la Hongrie, la Pologne, la Suède et la Yougoslavie. D'autres comparaisons se sont déroulées ailleurs et ont été organisées de telle sorte qu'un certain nombre de Pays membres situés dans une même région du monde aient la possibilité de comparer leurs lasers avec ceux du BIPM. À celle qui a eu lieu à Bratislava (Tchécoslovaquie) ont pris part la République démocratique allemande (avant la réunification), la Hongrie, la Tchécoslovaquie et l'URSS ; à celle qui a eu lieu à Borås (Suède) ont participé l'Allemagne, le Danemark, la Finlande et la Suède, dans les deux cas avec des lasers à hélium-néon asservis sur l'iode à  $\lambda = 633$  nm ; à Ottawa (Canada) ont pris part le Canada et l'URSS et à Braunschweig (Allemagne) ont pris part l'Allemagne et l'URSS, ces deux dernières comparaisons portant sur des lasers à hélium-néon asservis sur le méthane à  $\lambda = 3,39$   $\mu\text{m}$ . Une comparaison, portant sur des lasers asservis à  $\lambda = 633$  nm et  $\lambda = 3,39$   $\mu\text{m}$ , a été également faite avec le Japon, à Tsukuba (Japon), à l'occasion de la Conférence on Precision Electromagnetic Measurements en 1988. Le BIPM continue à fournir des cuves à iode aux laboratoires nationaux ; au total 77 cuves ont été remplies et vérifiées au BIPM depuis la précédente Conférence générale. Le BIPM coordonne l'approvisionnement en tubes laser, qu'il a spécifiquement étudiés pour l'utilisation en métrologie, en passant à la société japonaise NEC des commandes groupées pour le compte des laboratoires nationaux. Depuis la 18<sup>e</sup> Conférence générale plus d'une centaine de tubes laser au total ont été ainsi commandés pour environ vingt-cinq Pays membres de la Convention du Mètre. L'un des facteurs critiques qui influencent la fréquence d'un laser asservi sur l'iode est la qualité de la cuve à iode. Une comparaison de cuves à iode a été faite au BIPM sur des cuves provenant de laboratoires membres du CCDM ; trente-cinq cuves en tout ont été mesurées. Elles provenaient des laboratoires nationaux d'Allemagne, des États-Unis d'Amérique, d'Australie, du Canada, de la Rép. pop. de Chine, de la République de Corée, de France, d'Italie, du Japon et du Royaume-Uni. Un résultat important de cette comparaison a été d'établir une relation empirique entre le décalage de fréquence mesuré lorsque les cuves ont été montées sur les lasers du BIPM et le niveau d'impureté mesuré par fluorescence à une longueur d'onde de 502 nm. On a aussi étudié des lasers à hélium-néon asservis sur des transitions de la molécule d'iode

à  $\lambda = 543$  nm et 612 nm, à cuves internes ou externes, et sur une transition de la molécule de méthane à  $\lambda = 3,39$   $\mu\text{m}$  à cuve à méthane interne. L'expérience acquise avec des lasers asservis sur le méthane a montré qu'il est possible de stabiliser leur fréquence, sur des périodes couvrant plusieurs années, dans les limites d'environ 1 kHz, soit  $1 \times 10^{-11}$  près en valeur relative. Les comparaisons, mentionnées plus haut, effectuées au Canada et en Allemagne, nous ont permis de montrer que les mesures de la valeur absolue de la fréquence de la transition du méthane faites en Allemagne, au Canada, en URSS et en France (fondées sur une comparaison précédente qui a eu lieu en 1986) sont en bon accord. On a entrepris des recherches sur les propriétés métrologiques des diodes lasers asservies à une longueur d'onde de  $\lambda = 850$  nm sur l'absorption saturée du césium.

*Règles à traits et étalons à bouts.* — Depuis la décision prise en 1985 d'interrompre l'étalonnage des étalons à bouts dans l'interféromètre Tsugami, on n'a accepté d'étalonner, dans le comparateur interférentiel, que des étalons à bouts dont la longueur était comprise entre 500 mm et 1 000 mm environ. Au cours des quatre années écoulées ce genre d'étalonnages n'a été fait que pour la Roumanie. Des règles à traits de 1 mètre ont été étalonnées dans le comparateur interférentiel pour la République de Corée, la Hongrie, le Nigeria, la Pologne et l'URSS.

### *Masses*

*Étalons de masse.* — La troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme — cette expression désignant exclusivement des étalons nationaux en platine iridié — a commencé en 1989. Il est prévu qu'elle soit achevée à la fin de 1992. Une quarantaine de prototypes nationaux du kilogramme prennent part à cette vérification et, à l'époque de la préparation du présent rapport, vingt prototypes ont été vérifiés. On a commencé par comparer le prototype international, ses témoins et les étalons de travail du BIPM. Lors de ces comparaisons préliminaires on a étudié les variations de masse observées après le nettoyage-lavage du prototype international, de l'un de ses témoins et de deux autres étalons en platine iridié. Ces variations étaient de l'ordre de 1  $\mu\text{g}$  environ par mois sur une période d'environ quatre mois et ont amené le Comité international à spécifier que, pour les besoins de la troisième vérification, la masse du prototype international prise en considération serait celle qu'il a juste après le nettoyage-lavage suivant la méthode utilisée au BIPM et que cette masse serait déterminée par extrapolation ; les prototypes nationaux sont traités de la même façon. Stimulé par l'observation des variations de masse qui suivent le nettoyage-lavage, on a entrepris au BIPM l'étude des effets des conditions ambiantes d'humidité, de pression et de température sur la masse des étalons de 1 kg en platine iridié. Cette étude est faite en utilisant la balance à suspensions flexibles du BIPM, dont le défaut de répétabilité est inférieur à 0,1  $\mu\text{g}$ , et deux étalons en platine iridié polis à l'outil à la pointe de diamant, l'un de ces étalons ayant une surface totale double de celle de l'autre. Les mesures de l'effet des variations de l'humidité ambiante sont terminées et font apparaître des résultats dix fois plus petits que ceux rapportés précédemment. Depuis la 18<sup>e</sup> Conférence générale l'essentiel de l'effort dans ce domaine s'est porté sur la troisième vérification périodique et sur les recherches qui en découlent. On a étalonné des kilogrammes en acier inoxydable seulement pour la Belgique, la Hongrie, la Norvège et la Suisse. La construction d'étalons prototypes en platine iridié polis à l'outil à la pointe de diamant se poursuit et depuis la 18<sup>e</sup> Conférence générale on a fourni de nouveaux prototypes à l'Allemagne, au Canada, à la République de Corée, à Hong-Kong, à Israël et au Portugal.

*Balances.* – Peu après son installation au BIPM en 1970 et depuis lors, la balance NBS-2, à un seul plateau et deux couteaux, a été la principale balance utilisée au BIPM pour comparer les étalons de masse de 1 kg. Elle est maintenant équipée d'un lecteur interférométrique optique, qui permet d'enregistrer directement dans un ordinateur de bureau l'amplitude des oscillations du fléau. Les différences de masse en sont déduites ultérieurement. Cela a beaucoup réduit le travail exigé par cette balance et a permis d'améliorer le défaut de répétabilité des mesures, lequel est, maintenant et de façon courante, inférieur à  $1\ \mu\text{g}$  lors de comparaisons faisant intervenir jusqu'à six étalons de 1 kg. On se sert de la balance NBS-2 pour la troisième vérification des prototypes nationaux. L'ancienne balance principale du BIPM, la balance Rueprecht de 1 kg, ainsi que les balances Rueprecht de 50 g et de 20 g ont été équipées de récepteurs à barrettes de diode pour observer les oscillations du fléau. Comme pour la balance NBS-2, les oscillations du fléau sont mesurées et enregistrées directement par des ordinateurs de bureau. Le prototype de la balance à suspensions flexibles du BIPM est maintenant en fonctionnement comme il a été dit à propos de l'étude des effets de surface sur les étalons de 1 kg en platine iridié. On a commencé à construire une deuxième version de la balance à suspensions flexibles : elle permettra de comparer jusqu'à huit étalons de 1 kg (on ne peut en comparer que deux dans la première version). Les deux balances à suspensions flexibles sont montées dans des enceintes étanches dans lesquelles on peut faire le vide. La balance prototype à suspensions flexibles a été utilisée lors d'expériences portant sur la prétendue « 5<sup>e</sup> force » et sur des variations anormales de la masse signalées pour des gyroscopes en rotation. Dans les deux cas les résultats obtenus ont été négatifs mais cela a montré qu'il était utile de disposer d'une balance très précise pour des recherches sur certaines lois fondamentales de la physique. La balance Mettler entièrement automatique (Type HK 1000 MC), achetée en 1987, a été aussi installée dans une enceinte étanche et après diverses améliorations, en particulier en ce qui concerne la substitution des masses, elle donne maintenant entière satisfaction.

*Gravimétrie.* La troisième comparaison internationale de gravimètres absolus a eu lieu au BIPM, sous les auspices de l'Association internationale de géodésie, en novembre et décembre 1989. Des gravimètres absolus provenant d'Allemagne, des États-Unis d'Amérique, d'Autriche, du Canada, de la République populaire de Chine, de Finlande, d'Italie, du Japon, d'URSS et du BIPM, y ont pris part. De plus, des mesures relatives entre différents emplacements au BIPM ont été effectuées à l'aide de gravimètres relatifs provenant de sept instituts. Pendant la comparaison la fréquence du laser de chaque gravimètre était mesurée *in situ* par comparaison avec un laser à hélium-néon, asservi sur l'iode, appartenant au BIPM. On est arrivé à la conclusion que, pour certains gravimètres, l'exactitude des mesures de  $g$  est limitée par l'exactitude de la stabilisation de la longueur d'onde du laser. Dans l'ensemble les résultats sont satisfaisants et il est prévu qu'une nouvelle comparaison internationale aura lieu dans les quatre ans qui viennent.

### *Temps*

Depuis mars 1985 le TAI et l'UTC sont établis et diffusés régulièrement à partir du BIPM. Après l'approbation par la 18<sup>e</sup> Conférence générale du transfert au BIPM de la Section du temps du Bureau international de l'heure (BIH), qui se trouvait jusque-là à l'Observatoire de Paris, et à la suite de décisions ultérieures prises par les unions internationales concernées, le BIH a effectivement cessé d'exister le 1<sup>er</sup> janvier 1988. La partie du travail du BIH qui portait sur la rotation de la Terre a été confiée à un nouvel organisme, le Service international de la rotation terrestre, et le

Service du temps a été officiellement pris en charge par le BIPM. Le TAI est établi à partir des données de comparaisons d'horloges provenant d'environ 200 horloges réparties dans une cinquantaine d'instituts sur les cinq continents. L'algorithme utilisé pour établir l'échelle est conçu pour obtenir la meilleure stabilité possible à long terme. On poursuit le travail d'analyse et de comparaison à d'autres algorithmes en service dans les laboratoires nationaux. L'une des hypothèses de base du calcul du TAI suppose l'indépendance des horloges qui y participent. À la demande du CCDS nous avons testé cette indépendance en étudiant les corrélations entre les données des horloges. Ces corrélations peuvent avoir quelquefois des causes évidentes mais il est maintenant clair que certaines corrélations significatives proviennent d'une réponse similaire des horloges à des changements dans leur environnement, en particulier de l'humidité locale ambiante, qui varie en cours d'année avec les saisons. Les comparaisons d'horloges se font, en grande majorité, au moyen des satellites de l'US Global Positioning System (GPS) que l'on observe simultanément depuis plusieurs sites. Le programme de poursuite des satellites du GPS pour les laboratoires qui contribuent au TAI est maintenant établi régulièrement par le BIPM. L'utilisation du GPS a entraîné une forte amélioration de l'exactitude des comparaisons de temps, qui maintenant approche 10 ns. Pour tirer tous les avantages de cette plus grande exactitude, il convient maintenant d'être encore plus vigilant pour préparer et traiter les données et pour appliquer les corrections. Il s'est avéré que l'erreur sur les coordonnées relatives de quelques antennes du GPS dégradait de façon significative la qualité des comparaisons de temps. À la suite de recherches faites au BIPM, recherches qui ont mis ces erreurs en évidence, le BIPM a déterminé et publié des corrections de coordonnées pour 12 laboratoires en Europe, 4 en Amérique du Nord, 1 au Moyen-Orient et 6 en Extrême-Orient. Des recherches ont été faites sur la mesure des retards ionosphériques et les corrections aux données du GPS qui en résultent. Les premières mesures régulières de ces retards ont été faites en utilisant un récepteur du GPS à deux fréquences, sans dispositif de décodage, construit au BIPM par un stagiaire japonais. Pour la première fois en juin 1990, la *Circulaire T*, destinée à diffuser le TAI et l'UTC, comportait les résultats de UTC - temps du GLONASS ; le GLONASS est l'équivalent soviétique du GPS ; on l'utilise maintenant pour relier UTC(SU) à l'UTC. Le BIPM prend part aux discussions qui se déroulent au sein du groupe de travail de l'Union astronomique internationale sur les systèmes de référence dont le but est de donner des définitions cohérentes des coordonnées d'espace-temps dans une théorie de la relativité. L'exactitude actuelle des comparaisons d'horloges fait appel à des corrections relativistes ; celles-ci sont encore faciles à appliquer, mais les améliorations ultérieures de l'exactitude feront appel à des corrections plus complexes. Il semble que certains pulsars à la milliseconde présentent une période dont la stabilité rivalise avec celle des horloges atomiques. Il semble, toutefois, que ces pulsars, tels qu'ils sont observés sur la Terre, ne permettent pas à eux seuls de produire une échelle de temps uniforme parce qu'ils présentent une dérive de fréquence dont la valeur n'est pas connue. Néanmoins, il sera peut-être possible d'utiliser les informations des pulsars pour évaluer la stabilité du TAI à long terme lorsque l'on disposera de plusieurs années de données ; nous étudions actuellement cette possibilité. Une horloge à césium commerciale, prêtée par l'US Naval Observatory, a été installée au BIPM en 1990 et le récepteur du GPS du BIPM a été ramené de l'Observatoire de Paris, où il se trouvait, au BIPM. C'est le début de l'installation d'un groupe d'horloges commerciales, avec leurs équipements annexes, destiné à permettre au BIPM, à la demande du CCDS, de participer à des expériences de comparaison de temps et de maintenir ainsi le niveau de ses connaissances sur cet aspect important des travaux sur les échelles de temps.

*Électricité*

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1990 les nouveaux étalons de référence pour le potentiel et la résistance électriques fondés sur l'effet Josephson et l'effet Hall quantique ont été mis en œuvre au BIPM comme ils l'ont été dans d'autres laboratoires nationaux dans le monde entier. Le BIPM a joué un rôle important dans les travaux du CCE pour parvenir à un accord sur la formulation des recommandations à soumettre au CIPM concernant ces nouveaux étalons de référence et pour donner des conseils sur leur mise en œuvre.

*Résistance.* — Pour aider le CCE dans son travail et comparer les résultats de mesure de la résistance de Hall quantifiée, le BIPM a effectué en 1987 une comparaison d'étalons de  $1\ \Omega$  provenant des laboratoires nationaux des pays suivants : Rép. féd. d'Allemagne, É.-U. d'Amérique, Australie, Canada, Rép. pop. de Chine, France, Japon, Pays-Bas, Royaume-Uni, Suisse et URSS. Après la mise en œuvre des nouvelles recommandations et pour vérifier la reproductibilité du nouvel étalon de référence de résistance, fondé sur l'effet Hall quantique, le BIPM a organisé, à la demande du CCE, une autre comparaison internationale, portant cette fois-ci sur des étalons de résistance de  $1\ \Omega$  et de  $10\ \text{k}\Omega$  pour les laboratoires nationaux dont les étalons étaient fondés sur l'effet Hall quantique. Cette comparaison a eu lieu en 1990 et a rassemblé des étalons de résistance envoyés au BIPM par les laboratoires nationaux des pays suivants : Rép. féd. d'Allemagne, (ancienne) Rép. dém. allemande, É.-U. d'Amérique, Australie, Autriche, Canada, Rép. pop. de Chine, Finlande, France, Italie, Japon, Norvège, Pays-Bas, Portugal, Royaume-Uni, Suède, Suisse et URSS. On considère que les résultats sont assez bons ; ils s'accordent à quelques  $10^{-8}$  près pour la majorité des laboratoires qui annoncent des incertitudes de cet ordre. L'exactitude des résultats semble encore limitée par la stabilité des étalons voyageurs, les meilleurs se trouvant maintenant parmi les étalons de  $10\ \text{k}\Omega$ . Au BIPM, l'installation qui permet de réaliser un étalon de résistance au moyen de l'effet Hall quantique a été nettement améliorée au cours des quatre dernières années grâce à la mise au point d'un comparateur cryogénique de courants comportant un nouveau détecteur de zéro à SQUID qui sert de nanovoltmètre. On a aussi mis au point une nouvelle méthode pour mesurer la résistance quantifiée à l'aide d'un comparateur cryogénique de courants fonctionnant en courant alternatif à basse fréquence plutôt qu'en courant continu, ce qui permet d'effectuer les mesures avec tous les avantages que présentent les techniques en courant alternatif. La nécessité de se procurer les échantillons pour étudier l'effet Hall quantique a conduit le BIPM, en collaboration avec EUROMET, à passer aux Laboratoires d'électronique Philips une commande groupée d'échantillons. Le BIPM tient maintenant ces échantillons, qui paraissent tous donner satisfaction, à la disposition des laboratoires nationaux.

*Potentiel électrique.* — La mise au point des réseaux de jonctions de Josephson de  $1\ \text{V}$  et  $10\ \text{V}$  a considérablement fait progresser les techniques fondées sur l'effet Josephson et utilisées en métrologie. Au BIPM deux réseaux de  $1\ \text{V}$  sont maintenant en fonctionnement et les comparaisons faites entre eux donnent un accord à quelques dixièmes de nanovolt près. Cela a été mis en évidence grâce à des comparaisons directes ainsi qu'en utilisant un nouvel étalon de transfert qui permet de faire des comparaisons exactes soit entre des réseaux de jonctions de Josephson, soit entre un réseau de jonctions de Josephson et une pile Weston. Au moyen de l'un des réseaux de  $1\ \text{V}$  utilisé comme étalon voyageur, les étalons de la PTB et du BIPM ont été comparés, à la PTB, et l'accord s'est fait à quelques dixièmes de nanovolt près. On a trouvé des accords comparables entre le réseau du BIPM et des réseaux apportés

au BIPM par le laboratoire national danois et par le LCIE. Il est prévu de transporter l'étalon voyageur de Josephson du BIPM au NIST à Washington et au NRC à Ottawa d'ici à la fin de 1991. Un comparateur de 1 V à 10 V, construit au BIPM, est maintenant en service pour étalonner couramment des étalons à diode de Zener de 10 V.

*Supraconducteurs à haute température pour la métrologie.* — Des recherches ont été faites en vue d'utiliser certains supraconducteurs à haute température pour établir des étalons de référence à effet Josephson. Peu après leur découverte on a montré au BIPM que le rapport de la fréquence à la tension des jonctions de Josephson fabriquées à partir de ces nouveaux matériaux était en accord avec celui que l'on obtenait pour des jonctions métalliques à quelques  $10^{-6}$  près et des améliorations vont être encore apportées à ces mesures. Des recherches sont aussi en cours pour utiliser ces matériaux comme écrans électromagnétiques dans certaines applications métrologiques critiques.

*Étalonnages.* — C'est dans le domaine de l'électricité que les étalonnages effectués pour les laboratoires nationaux ont été les plus nombreux. Depuis la dernière Conférence générale 100 certificats ont été rédigés pour les étalonnages de résistances, de piles Weston ou d'étalons à diode de Zener pour les laboratoires nationaux de l'Afrique du Sud, de l'ancienne Rép. dém. allemande, de l'Autriche, de la Belgique, du Brésil, de la Bulgarie, de la Rép. pop. de Chine, de la République de Corée, de la République populaire démocratique de Corée, de l'Égypte, de la Finlande, de la Hongrie, d'Irlande, d'Israël, d'Italie, de la Norvège, des Pays-Bas, de la Pologne, du Portugal, de la Roumanie, du Royaume-Uni, de la Suède, de la Suisse, de la Tchécoslovaquie, de l'URSS et de la Yougoslavie.

#### *Radiométrie et photométrie*

Depuis la 18<sup>e</sup> Conférence générale un nouveau laboratoire pour la radiométrie a été constitué. Les préparatifs sont maintenant bien avancés en vue d'une comparaison internationale de sensibilité spectrale de photodiodes au silicium qui doit se dérouler au BIPM à la suite de la décision prise par le CCPR lors de sa session de 1990. Le laboratoire du BIPM est maintenant entièrement équipé pour procéder à cette comparaison et il a déjà acquis une certaine expérience du comportement des photodiodes au silicium en radiométrie. Des recherches expérimentales et théoriques ont été effectuées sur la technique d'auto-étalonnage et sur les effets des modifications des couches superficielles dues au nettoyage ou aux variations de l'humidité ambiante. Pour tout ce nouveau travail sur la radiométrie, on a d'emblée conçu des installations entièrement automatisées afin que les mesures soient toujours pilotées par ordinateur. La reproductibilité et la cohérence des résultats obtenus sont une preuve du bien-fondé de cette façon de faire. Au cours de ces dernières années l'activité du BIPM en photométrie a été limitée puisque l'attention du CCPR était davantage dirigée vers la radiométrie. On continue toutefois d'étalonner des lampes étalons d'intensité lumineuse et de flux lumineux en fonction des valeurs ajustées des étalons qui résultent de la comparaison internationale de 1985. En collaboration avec le NPL (Royaume-Uni) et l'INM (France), le BIPM a effectué une étude complémentaire pour tenter, finalement sans succès, de rendre compte des incohérences que l'on constate dans les résultats de cette comparaison. Depuis la 18<sup>e</sup> Conférence générale des lampes ont été étalonnées pour la Bulgarie, la Pologne, la Roumanie, la Suède, l'URSS et la Yougoslavie. Le BIPM préside un groupe de travail du CCPR chargé de rechercher pour l'avenir une source d'approvisionnement en lampes étalons d'intensité lumineuse et de flux lumineux. Des contacts ont été pris avec un certain nombre de fabricants.

### *Thermométrie et mesures de pression*

Suite à la décision prise par le CIPM en 1985 de porter son effort sur la radiométrie aux dépens de la thermométrie, aucune nouvelle recherche n'a été entreprise et les étalonnages pour les laboratoires nationaux ont cessé. Cependant on a conservé les possibilités d'étalonnage dans l'important domaine voisin de la température ambiante dont les autres sections du BIPM ont besoin pour leurs travaux. L'EIT-90 a été réalisée dans le domaine compris entre 0 °C et 30 °C et les recherches continuent sur la stabilité à long terme des cellules à point triple de l'eau et sur l'effet d'immersion des thermomètres à résistance de platine dans les cellules à point triple de l'eau et du gallium. Les mesures de pression de grande exactitude constituent toujours un impératif essentiel pour le calcul de l'effet de la poussée de l'air en métrologie des masses. C'est pourquoi le manobaromètre interférentiel du BIPM doit être conservé en état de marche et on envisage de le faire réviser par une société française.

### *Rayonnements ionisants*

*Dosimétrie.* Dans le domaine de la dosimétrie des rayons X et des rayons  $\gamma$  les travaux de recherche se poursuivent en vue d'améliorer la mesure de la dose absorbée dans l'eau, et à titre intermédiaire, dans le graphite. Ces travaux, qui sont à la fois expérimentaux et théoriques, ont comporté l'analyse des caractéristiques de la nouvelle source de  $^{60}\text{Co}$  installée en 1987. Le spectre d'énergie de cette source, dont l'activité est de 176 TBq, a été obtenu par des calculs ultérieurement confirmés par des mesures de la transmission du faisceau par un filtre d'eau. Pour obtenir la dose absorbée dans l'eau on a utilisé des méthodes ionométriques qui donnent directement la dose absorbée et on a aussi utilisé la méthode dite du « scaling theorem » fondée sur une mesure ionométrique de la dose absorbée dans le graphite. Les résultats obtenus avec ces deux méthodes étaient en bon accord. Une troisième méthode pour obtenir la dose absorbée dans l'eau, mise en œuvre au BIPM, consiste à utiliser un calorimètre à eau. On mesure maintenant le kerma dans l'air avec la nouvelle source de  $^{60}\text{Co}$  et les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux que l'on obtenait avec l'ancienne source, laquelle était beaucoup plus faible. On a effectué des comparaisons d'étalons de dose absorbée, de kerma dans l'air ou d'exposition avec des étalons en provenance d'Allemagne, des États-Unis d'Amérique, d'Australie, du Canada, de Hongrie, du Royaume-Uni et de Suisse. Des étalonnages ont été faits pour des laboratoires du Brésil, du Danemark, de l'Espagne, de la Norvège, de la Pologne, du Royaume-Uni, de la Yougoslavie et de l'Agence internationale de l'énergie atomique (Vienne). Dans le domaine de la dosimétrie des neutrons les recherches ont commencé en vue de déterminer les spectres de neutrons dans les champs neutroniques fournis par les sources du BIPM au moyen d'un détecteur liquide à scintillation équipé d'un discriminateur de forme d'impulsions. La comparaison internationale de dosimétrie neutronique organisée par le BIPM s'est achevée en 1988. Les laboratoires d'Allemagne, des États-Unis d'Amérique, de la Rép. pop. de Chine, du Japon, des Pays-Bas et du Royaume-Uni y ont pris part. Dans l'ensemble les résultats étaient bons : des différences trouvées pour deux laboratoires ont permis d'identifier des erreurs d'ordre technique qui étaient demeurées insoupçonnées auparavant. Un certain nombre de détecteurs neutroniques ont été étalonnés pour des laboratoires français.

*Radionucléides.* — Une comparaison internationale de mesures de l'activité de  $^{125}\text{I}$  a été faite avec des laboratoires d'Afrique du Sud, d'Allemagne, des É.-U. d'Amérique, de Belgique, du Brésil, du Canada, de la Rép. pop. de Chine, de la République de Corée, de France, de Hongrie, d'Indonésie, d'Italie, du Japon, de Pologne, du Royaume-Uni, de Tchécoslovaquie et d'URSS. La dispersion totale des résultats est

de 7 %. Une comparaison restreinte de  $^{75}\text{Se}$  s'est déroulée en 1989 entre l'Allemagne, le Canada, la France et la Hongrie. Les résultats ont été considérés comme suffisamment bons pour justifier une comparaison plus large que le BIPM organise actuellement. Le Système international de référence pour la mesure de l'activité d'émetteurs de rayons  $\gamma$ , le SIR, est étendu à des radionucléides qui ne peuvent pas être mesurés à l'aide d'une chambre à ionisation. On utilise dans ce cas-là un système à scintillateur liquide qui est maintenant en service et permettra d'étendre le SIR aux émetteurs de particules  $\beta$  et  $\alpha$ . Pour acquérir de l'expérience avec ce nouveau système le BIPM participe à une comparaison internationale de  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  et  $^{99}\text{Tc}$  qu'organise le NIST (Washington). La mesure exacte de l'activité des radionucléides implique une bonne connaissance des statistiques de comptage. Depuis de nombreuses années des recherches sont faites au BIPM sur l'aspect fondamental de la question et cette activité se poursuit. On a, en particulier, étudié les caractéristiques d'une série de temps morts en fonction d'un temps mort généralisé unique; une méthode toute nouvelle de comptage par corrélation modulo 2 a été mise au point ainsi que la méthode dite de parité qui permet d'obtenir le taux de comptage des coïncidences entre les émissions  $\beta$  et  $\gamma$ . De plus des recherches ont été faites sur des caractéristiques particulières de la distribution de Poisson.

### Publications

Depuis octobre 1987 ont été publiés :

- 18<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures (1987), Comptes rendus*, 108 pages.
- Procès-Verbaux des séances du Comité international des poids et mesures*, T. **55** (76<sup>e</sup> session, octobre 1987), 178 pages, T. **56** (77<sup>e</sup> session, octobre 1988), 148 pages, T. **57** (78<sup>e</sup> session, septembre 1989), 208 pages, T. **58** (79<sup>e</sup> session, septembre 1990), 159 pages.
- Comité consultatif d'électricité*, 17<sup>e</sup> session (1986), 189 pages, 18<sup>e</sup> session (1988), 168 pages.
- Comité consultatif de photométrie et radiométrie*, 12<sup>e</sup> session (1990), 47 pages.
- Comité consultatif de thermométrie*, 16<sup>e</sup> session (1987), 162 pages, 17<sup>e</sup> session (1989), 79 pages.
- Comité consultatif des unités*, 10<sup>e</sup> session (1990), 54 pages.
- Comité consultatif pour la définition de la seconde*, 11<sup>e</sup> session (1989), 70 pages.
- Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants*, Sections I, II, III (1988), 136 pages.
- Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées*, 3<sup>e</sup> session (1988), 70 pages.
- Rapport annuel de la section du temps du BIPM*, vol. **1**, 1988, 136 pages, vol. **2**, 1989, 130 pages, vol. **3**, 1990, 131 pages.
- Circulaire D* (contribution du BIPM sur les échelles de temps) (mensuelle), 4 pages.
- Circulaire T* (mensuelle), 4 pages.
- Recueil de travaux du BIPM*, vol. **11** (1987-1988).
- Le BIPM et la Convention du Mètre*, 1987, 47 pages (réimpression).
- Le Pavillon de Breteuil*, 1991, 20 pages.
- Techniques for Approximating the International Temperature Scale of 1990*, juillet 1990, 205 pages.
- Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990*, décembre 1990, 177 pages.
- Le Système international d'unités (SI)*, 6<sup>e</sup> édition (1991), 118 pages.
- Vérification des étalons et des instruments au BIPM* (1991), 24 pages.

A ces publications il convient d'ajouter 44 rapports BIPM, environ 120 articles parus dans des revues scientifiques, des comptes-rendus de conférences et *Metrologia*, revue internationale de métrologie pure et appliquée, qui à partir du volume 28 (1991) est publiée ainsi qu'éditée au BIPM.

Depuis la précédente Conférence générale, M. P. Giacomo, qui était alors directeur du BIPM, a pris sa retraite après vingt-deux ans de dévoués services au BIPM, dont dix en tant que sous-directeur et dix en tant que directeur. M. T. J. Quinn, précédemment sous-directeur, lui a succédé le 1<sup>er</sup> août 1988. Peu après son départ en retraite, M. Giacomo a reçu les insignes de chevalier de la Légion d'honneur des mains de M. Curien, ministre de la Recherche et de la Technologie, lors d'une cérémonie qui s'est déroulée au BIPM, en reconnaissance de sa longue et brillante carrière au service de la recherche scientifique et de la métrologie en particulier. Je saisis l'occasion de lui présenter les remerciements du Comité international au nom des États membres de la Convention du Mètre.

M. MARÉCHAL remercie le président du Comité international pour la qualité de l'exposé qu'il vient de faire sur les travaux accomplis ou en cours au BIPM depuis la dernière Conférence générale. Il sollicite des commentaires éventuels de la part des participants à la Conférence. Personne ne demandant la parole, il suggère de procéder dès cette première séance à la constitution du Groupe de travail chargé de préparer la discussion sur la dotation du BIPM pour les quatre années 1993-1996, discussion qui doit avoir lieu au point 16 de l'ordre du jour.

M. KOVALEVSKY rappelle que le choix des pays appelés à participer aux travaux de ce groupe de travail *ad hoc* tient compte de l'importance du pourcentage de contribution des États ainsi que d'un certain équilibre géographique. Après quelques échanges de vue assez brefs, le groupe est constitué comme suit : Allemagne, Amérique (États-Unis d'), Canada, Chine (Rép. pop. de), Danemark, Espagne, France, Japon, Mexique, Royaume-Uni, Tchécoslovaquie et URSS.

Sur proposition de M. KOVALEVSKY, M. PRESTON-THOMAS, vice-président du Comité international, est nommé président de ce groupe de travail *ad hoc*, étant bien précisé que dans ce rôle M. Preston-Thomas n'agit pas en tant que représentant de son pays.

Il est convenu que le groupe de travail se réunira le mardi 1<sup>er</sup> octobre à 10 h 30.

La séance est levée à 12 h 20.

---

---

DEUXIÈME SÉANCE  
DE LA 19<sup>e</sup> CONFÉRENCE GÉNÉRALE  
DES POIDS ET MESURES

tenue le lundi 30 septembre 1991, à 15 heures

---

La suite de l'ordre du jour comporte la présentation par chaque président des Comités consultatifs de son rapport sur les problèmes dont ces Comités ont eu à connaître depuis la réunion de la précédente Conférence générale. Il est rappelé que ces comités consultatifs ont été créés en vue d'aider le CIPM à prendre les décisions qui s'imposent dans des domaines spécifiques. Le texte complet des rapports, en version bilingue français-anglais, avait été remis aux délégués en début de réunion.

#### **7. Longueur et définition du mètre**

La parole est donnée à M. D. KIND, président du Comité consultatif pour la définition du mètre, pour la présentation de son rapport.

En octobre 1987, lors de la 18<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures (CGPM), je terminais mon rapport en annonçant que le Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM) se réunirait en 1989, ce qu'il ne fera finalement qu'en 1992. On peut donc considérer que la dix-septième CGPM réunie en 1983, en adoptant une nouvelle définition du mètre fondée sur une valeur fixe de la vitesse de la lumière, et que le Comité international des poids et mesures (CIPM), en fournissant la mise en pratique de cette nouvelle définition, ont réalisé un excellent travail puisque aucune réunion du CCDM n'a été nécessaire depuis 1982.

Cependant, avant de rappeler les progrès réalisés ces dernières années dans le domaine des mesures absolues de fréquence et dans celui des comparaisons internationales de lasers asservis, ainsi que dans l'évolution des techniques, je voudrais rappeler que la définition du mètre a pu être modifiée en 1983 grâce à la première détermination absolue de la fréquence du laser à He-Ne asservi sur une transition de la molécule du méthane à  $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$  ; c'était au National Institute of Standards and Technology (États-Unis d'Amérique) en 1972, il y a donc presque vingt ans. Dans le même temps, différents laboratoires nationaux et le BIPM ont mesuré la longueur d'onde

dans le vide de la radiation émise par ce même laser, obtenant ainsi une détermination très précise de la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide. Plus récemment, de nouvelles déterminations absolues de la fréquence de ce laser asservi sur le méthane ont été effectuées avec une reproductibilité relative de l'ordre de  $1 \times 10^{-11}$ . L'ensemble de ces mesures a confirmé l'écart moyen de  $8 \times 10^{-11}$  avec la valeur adoptée en 1983, écart que j'avais mentionné dans mon rapport à la précédente conférence. De plus, des lasers transportables de ce type (du VNIIFTRI [URSS] et du BIPM) ont permis de montrer que les valeurs absolues obtenues par les chaînes de fréquence des laboratoires nationaux ne présentaient pas entre elles de décalage de fréquence systématique au niveau de quelques  $10^{-11}$ .

Par ailleurs, il y a lieu de souligner que, depuis 1983, un très grand nombre de pays se sont équipés de lasers asservis dont les radiations sont recommandées par le CIPM dans la mise en pratique de la définition du mètre, essentiellement le laser à hélium-néon asservi sur l'absorption saturée de l'iode à  $\lambda = 633$  nm. Ces cinq dernières années, une vingtaine de comparaisons de lasers par battements ont eu lieu ; le BIPM a joué un rôle essentiel dans la plupart d'entre elles. Ces comparaisons ont permis de montrer l'importance de certains paramètres qui limitent la reproductibilité de la fréquence des lasers et de diminuer la dispersion des résultats grâce à un contrôle plus précis de la valeur de ces paramètres.

Des décalages de fréquence importants pouvant être engendrés par la présence d'impuretés dans les cuves d'absorption, principalement les cuves d'iode, le BIPM a organisé, en accord avec les laboratoires membres du CCDM, une comparaison de cuves à iode leur appartenant. Plus de quarante cuves ont été étudiées. Les résultats provisoires font apparaître un accord en fréquence entre la plupart des cuves de l'ordre de  $\pm 2 \times 10^{-11}$  en valeur relative.

Les résultats récents obtenus sur de nouvelles transitions moléculaires, comme celles de l'iode utilisées pour asservir un laser à hélium-néon à  $\lambda = 544$  nm et celles du tétraoxyde d'osmium utilisées pour asservir un laser à  $\text{CO}_2$  à  $\lambda = 10,6$   $\mu\text{m}$ , ou atomique comme celle du calcium utilisée dans un jet pour asservir un laser à colorant à  $\lambda = 657$  nm, permettent de prévoir que la liste actuelle des six radiations recommandées sera bientôt étendue. Des résultats encourageants ont aussi été obtenus avec des lasers à diode qui fonctionnent maintenant dans le domaine du visible. De nouvelles techniques d'asservissement, la spectroscopie hétérodyne par exemple, devraient améliorer notablement aussi bien la stabilité que la reproductibilité de la fréquence des lasers. Plusieurs laboratoires nationaux sont sur le point d'effectuer des mesures absolues de fréquences dans le domaine visible, ce qui devrait permettre d'affiner les valeurs attribuées aux radiations recommandées et d'en diminuer l'incertitude d'un ordre de grandeur au moins. Enfin, des résultats spectaculaires ont été obtenus dans le domaine des ions piégés et sur le refroidissement de jets atomiques et moléculaires.

Par ailleurs, dans le domaine des étalons de longueurs à traits et à bouts, la plupart des laboratoires nationaux sont maintenant capables de relier ces étalons aux longueurs d'onde recommandées.

Le CCDM, à sa sixième session en 1979, a décidé d'organiser une comparaison d'étalons d'angle, le National Research Laboratory of Metrology (NRLM), Japon, jouant le rôle de laboratoire pilote. Il s'agissait d'une comparaison circulaire de deux miroirs polygonaux entre les laboratoires membres du CCDM. Cette comparaison s'est achevée en 1987, mais les résultats définitifs n'étaient pas encore disponibles lors de la dix-huitième CGPM, en octobre 1987.

En 1992, le CCDM devra donc prendre en compte l'ensemble de ces nouveaux résultats ; il devra notamment proposer au CIPM, comme ce dernier l'avait prévu, une révision de la mise en pratique de la définition du mètre, c'est-à-dire un réajustement des valeurs attribuées aux radiations recommandées ainsi que des valeurs des paramètres affectant la fréquence.

Le CCDM ne s'étant pas réuni depuis 1982, le rapport ne donne lieu à aucune question ni aucun commentaire et le président aborde le point suivant de l'ordre du jour.

## **8. Masse et grandeurs apparentées**

M. BRAY, président du Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées, donne lecture de son rapport.

Le Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM) s'est réuni deux fois depuis la 18<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures (CGPM), une première fois en 1988 puis en 1991 pour sa quatrième session depuis sa création en 1981.

Avant la deuxième session, en 1985, le CCM comptait neuf groupes de travail. Il n'en subsiste aujourd'hui plus que six. Lors de la session de 1988 il a été décidé de fusionner le groupe de travail 2 « Mesure directe de la masse volumique de l'air » et le groupe de travail 5 « Masse volumique de liquides et solides » en un seul groupe désigné sous le nom « Masse volumique », et de fusionner le groupe de travail 3 « Conservation des étalons de masse » et le groupe de travail 4 « Étalons de masse en acier inoxydable » en un seul groupe désigné sous le nom « Étalons de masse ». Étant donnée l'importance du travail à effectuer sur les balances, le CCM a décidé lors de cette même session de 1988, de créer un « Club » sur les balances, auquel toute personne intéressée pourrait prendre part, pour confronter les diverses expériences acquises dans le domaine de la conception et de la construction des balances de précision. Enfin, lors de sa quatrième session en 1991, le CCM a décidé de fusionner en un seul groupe de travail « Basses pressions » les groupes de travail « Basses pressions » et « Très basses pressions ». Par conséquent, les six groupes de travail actuels du CCM couvrent les domaines suivants : étalons de masse, masse volumique, force, hautes pressions, moyennes pressions et basses pressions.

### *Troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme*

La troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme a débuté en septembre 1988 et est encore en cours. Trente-cinq prototypes nationaux ont été envoyés au BIPM. Je rappelle pour mémoire que les deux précédentes vérifications périodiques ont eu lieu de 1899 à 1911 et de 1946 à 1953.

La troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme s'effectue en deux étapes : 1) comparaison du prototype international du kilogramme à ses témoins et aux étalons du BIPM ; 2) comparaison des prototypes nationaux à deux des témoins.

Avant de débiter la première de ces étapes, on a procédé à une étude préliminaire pour évaluer les variations de la masse de plusieurs prototypes après nettoyage-lavage suivant la méthode utilisée au BIPM ; l'étude portait sur le prototype international, l'un de ses témoins et deux prototypes en platine iridié polis et ajustés à l'aide d'un outil à pointe de diamant. Les résultats de cette étude et de la comparaison du prototype international à ses témoins et à un certain nombre de prototypes du BIPM ont été présentés à la session du Comité international des poids et mesures (CIPM) en 1989, puis à une réunion *ad hoc* du groupe de travail du CCM sur les étalons de masse. Sur la base de ces résultats, le CIPM a décidé que, pour les besoins de la troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme, on considérera que la masse du prototype international à laquelle on se réfère est celle de ce prototype juste après son nettoyage-lavage suivant la méthode du BIPM et que cette masse sera déterminée par extrapolation. Le CIPM a clairement fait savoir qu'il ne s'agissait nullement d'une redéfinition du kilogramme.

Pour la deuxième étape de la vérification, il a été décidé d'abord de comparer les prototypes nationaux, dans leur état d'arrivée au BIPM, avec deux des étalons en platine iridié du BIPM, puis de les soumettre au nettoyage-lavage et de les comparer à deux des témoins du prototype international, eux-mêmes nettoyés et lavés préalablement.

Les résultats préliminaires portant sur les vingt premiers prototypes nationaux participant à la troisième vérification sont maintenant disponibles. Ils permettent de donner les indications suivantes :

1) la variation de masse observée dans les années qui suivent un nettoyage-lavage sur le prototype international, ses six témoins, et les vingt premiers prototypes nationaux, est d'environ  $1 \mu\text{g}$  par an ; ces résultats confirment ceux que l'on a pu observer au cours des vingt dernières années ;

2) lorsque l'on compare les témoins et les vingt premiers prototypes nationaux au prototype international, on observe une augmentation moyenne de masse de ceux-ci d'environ  $30 \mu\text{g}$  depuis 1889.

En attendant de disposer des résultats de la vérification des trente-cinq prototypes nationaux, il est recommandé aux laboratoires nationaux, conformément à la Résolution 2 de la 18<sup>e</sup> Conférence générale, de poursuivre leurs recherches sur la composition et le comportement superficiel du platine iridié et des autres alliages. Considérant notre mauvaise connaissance de la dérive à long terme de la masse du prototype international et des prototypes nationaux, et le besoin d'une référence dont la stabilité à long terme soit assurée, les laboratoires nationaux sont encouragés à poursuivre leurs expériences pour établir un lien pratique, au niveau de  $1 \times 10^{-8}$  en valeur relative, entre les étalons de masse macroscopiques et les phénomènes atomiques ou quantiques.

#### *Étalons de masse*

#### *Nettoyage et autres effets de surface*

Parallèlement à la méthode de nettoyage-lavage des prototypes en platine iridié, d'autres techniques ont été essayées et sont actuellement à l'étude. Ces techniques sont fondées sur : (a) un lavage de longue durée dans de la vapeur d'eau, sans surpression, (b) un nettoyage aux ultrasons à l'aide d'un solvant, (c) un nettoyage à

l'aide d'un solvant, dans un appareil de Soxhlet modifié, et (d) un lavage aux ultrasons à l'aide d'un solvant. D'autres recherches sont en cours, dans le but : (a) de déterminer les variations de masse en fonction de l'état de surface et des conditions ambiantes, en particulier de l'humidité, et (b) de définir les caractéristiques des échantillons polis à l'aide d'un outil à pointe de diamant.

Certains types d'acier inoxydable ont été étudiés pour déterminer leur résistance à la corrosion, le vieillissement de leur état de surface à long terme et l'efficacité du lavage à la vapeur d'eau additionnée d'un détergent.

#### *Comparaisons internationales d'étalons secondaires*

Un questionnaire sur les étalons secondaires et les étalons de référence du kilogramme a été envoyé aux laboratoires membres du groupe de travail « Étalons de masse » du CCM. Neuf laboratoires sur les dix contactés ont répondu à ce questionnaire. Les questions et réponses peuvent se résumer comme suit :

1. Exactitude des étalons : elle varie de 11  $\mu\text{g}$  à 22  $\mu\text{g}$  pour pratiquement tous les étalons secondaires, et de 13  $\mu\text{g}$  à 75  $\mu\text{g}$  pour les étalons de référence.
2. Composition des étalons : la plupart des étalons sont en acier inoxydable, mais il existe aussi des étalons en alacrite XSII ou en nimonic 105.
3. Nettoyage des étalons : les méthodes de nettoyage diffèrent et varient, par exemple, d'un simple époussetage à un dégraissage à la vapeur d'alcool.
4. Masse volumique des étalons : la masse volumique de tous les étalons étudiés a été déterminée directement par pesée hydrostatique avec une incertitude relative de  $\pm 1 \times 10^{-6}$  à  $\pm 2 \times 10^{-5}$ .
5. Poussée de l'air : tous les laboratoires qui calculent la correction de poussée de l'air à partir de la mesure des paramètres de l'air ambiant utilisent la formule qui a été recommandée par le CIPM. Les incertitudes relatives de mesure varient de  $\pm 1 \times 10^{-4}$  à  $\pm 3 \times 10^{-4}$ , mais dans certains laboratoires la poussée de l'air est déterminée directement avec une incertitude relative de  $\pm 5 \times 10^{-5}$ .
6. Balances : l'exactitude varie de 1  $\mu\text{g}$  à 30  $\mu\text{g}$ .
7. Comparaison : tous les laboratoires trouvent qu'une comparaison serait utile et désirent y participer. Elle devrait commencer à la fin de 1993.

#### *Autres questions*

Une étude a été entreprise pour identifier les sources d'erreurs dans les pesées occasionnées par des interactions magnétiques. Le rapport comprend des informations sur les propriétés magnétiques des matériaux utilisés dans la construction des balances et des étalons de masse. Un instrument a été construit pour mesurer la susceptibilité magnétique des étalons en acier inoxydable de 1 kg à 10 kg, dans un intervalle compris entre  $\chi = 0,001$  et  $\chi = 0,01$ .

#### *Masse volumique*

En liaison avec la détermination de la masse volumique d'étalons solides, une comparaison entre plusieurs laboratoires a été effectuée et le rapport final a été publié dans *Metrologia*, 1990, 27, pp. 139-144.

Un groupe de travail restreint comprenant le BIPM a été constitué pour mettre au point une formule donnant la masse volumique de l'eau à partir des données récentes. Deux laboratoires nationaux participent à ce travail en utilisant le SMOW (Standard Mean Ocean Water) et un étalon de volume sphérique. Le rapport final de cette étude est en préparation. Les résultats provisoires obtenus par les deux laboratoires participant à cette étude pour la masse volumique de l'eau à la température de référence diffèrent entre eux d'environ  $3 \times 10^{-6}$  en valeur relative. Un dispositif séparé pour la détermination de la masse volumique de l'eau est à l'étude dans un autre laboratoire national ; il devrait permettre d'obtenir une incertitude de mesure inférieure à  $1 \times 10^{-6}$  en valeur relative.

Les variations naturelles de la masse volumique du mercure et le nombre restreint de laboratoires équipés pour effectuer des mesures relatives ou absolues de haute précision de la masse volumique du mercure risquent de poser des problèmes pour effectuer des mesures de pression au plus haut niveau d'exactitude dans le voisinage de 100 kPa. Pour améliorer la situation actuelle, le CCM a adopté une recommandation pour encourager les laboratoires nationaux à développer et maintenir leurs capacités actuelles dans ce domaine.

La formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide, approuvée par le CIPM en 1981, est toujours valable dans sa forme actuelle, mais il est possible d'obtenir des mesures plus précises de la masse volumique de l'air, si l'on tient compte de certains changements, tels que : une meilleure estimation de la constante molaire des gaz  $R$  recommandée par CODATA, les calculs les plus récents de la pression de vapeur saturante  $p_{sv}$  et du facteur de compressibilité  $Z$ , ainsi que la nouvelle Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90). Le CCM a donc recommandé une modification du texte adopté en 1981. La détermination directe de la masse volumique de l'air effectuée dans un laboratoire national avec une exactitude de  $\pm 5 \times 10^{-5}$  en valeur relative est bien en accord avec la formule de 1981. Dans une étude effectuée par un autre laboratoire national sur l'influence des variations de la masse volumique de l'air sur les pesées, trois méthodes ont été comparées. Elles font appel : 1) à des calculs de la masse volumique de l'air fondés sur la formule du CIPM de 1981 qui tient compte des paramètres de l'atmosphère ambiante, 2) à des calculs fondés sur la pesée d'étalons de même masse nominale et de même surface, mais de volume très différent et, 3) à un réfractomètre laser. Les comparaisons entre la première et la troisième méthode sont, autant que l'on puisse en juger, satisfaisantes.

### *Force*

Grâce à de nombreuses comparaisons internationales il a été possible d'établir un réseau qui relie les étalons de force installés dans les laboratoires primaires d'Europe, des États-Unis d'Amérique, du Japon et de la République populaire de Chine. Les résultats des études sur les incertitudes de mesure ont permis de tirer les conclusions suivantes :

1. Il existe une interaction entre l'étalon de mesure et le capteur de force étudié : cette interaction dépend de la position du capteur de force par rapport à l'instrument.

2. Les comparaisons internationales de dix machines à masse suspendue jusqu'à 1 MN effectuées entre 1980 et 1988 montrent des différences relatives de  $\pm 5 \times 10^{-5}$  par rapport à la valeur moyenne, alors que l'incertitude théorique relative de chaque machine n'est que de  $\pm 2 \times 10^{-5}$ .

3. Les comparaisons internationales de sept machines à amplification hydraulique et de huit machines à levier jusqu'à 1 MN effectuées entre 1980 et 1988 montrent des différences relatives par rapport à la valeur moyenne de  $\pm 5 \times 10^{-4}$  alors que l'incertitude théorique relative peut varier de  $\pm 1 \times 10^{-4}$  à  $\pm 5 \times 10^{-4}$ .

4. Les deux comparaisons ont été faites avec une machine à amplification hydraulique et un système à pyramide de capteurs, dans lesquels un capteur de force inconnu est étalonné par rapport à trois capteurs de force de référence. Pour des charges supérieures à 1 MN on peut utiliser une machine à amplification hydraulique, qui sert de comparateur entre un capteur de force de référence et le capteur de force à étalonner. Avec les méthodes à pyramide de capteurs et à capteur de force étalon on peut obtenir une exactitude de l'ordre de  $1 \times 10^{-3}$  en valeur relative. De telles méthodes conviennent pour des machines d'une capacité supérieure à 1 MN et leur utilisation ainsi que leur amélioration — est recommandée.

En liaison avec les besoins de l'industrie, les laboratoires nationaux utilisent différentes normes pour l'étalonnage des capteurs de force. Il semble donc qu'il serait utile de disposer de deux types de normes pour répondre aux besoins pratiques de l'industrie, un premier pour les capteurs de force de grande précision et un second pour les besoins de moindre précision.

#### *Hautes pressions*

La comparaison internationale de mesures de pression de 20 MPa à 100 MPa dans un milieu liquide, qui a débuté en 1981, s'est déroulée en quatre phases. Elle s'est terminée à la fin de 1990. Dix-sept laboratoires ont participé à cette comparaison sous la responsabilité du laboratoire pilote. L'étalon de transfert était une balance de pression à huile. Les valeurs obtenues sont en accord seulement à  $233 \times 10^{-6}$  près aux plus basses pressions, mais pour dix laboratoires les valeurs obtenues sont en accord à  $53 \times 10^{-6}$  près. La dispersion des valeurs obtenues à la pression la plus élevée, 100 MPa, atteint  $414 \times 10^{-6}$ , bien que onze laboratoires obtiennent des valeurs à l'intérieur de  $78 \times 10^{-6}$ . Depuis le début, cette comparaison a révélé un phénomène inattendu, la variation de la surface effective du piston au cours du temps. Ce phénomène a été pris en compte lors de la comparaison des résultats des différents laboratoires, en supposant que cette variation était fonction linéaire du temps.

Les récentes activités du groupe de travail « Hautes pressions » comprennent :

1. L'organisation d'un séminaire international sur la « Métrologie des hautes pressions » en mai 1988 et la publication des comptes rendus en liaison avec le BIPM (*BIPM Monographie 89/1*).

2. La détermination par des méthodes expérimentales et par des calculs du coefficient de déformation de l'ensemble piston-cylindre utilisé dans les balances de pression.

3. L'étude des capteurs de pression utilisés comme étalons de transfert dans le domaine de pression du gigapascal.

4. L'étude de certains effets sur les jauges à piston à gaz lorsqu'elles sont utilisées pour mesurer des pressions absolues ou des pressions relatives et avec des gaz différents.

5. Des mesures de pression dynamiques.

### *Moyennes pressions*

Une comparaison internationale dans le domaine de pression de 10 kPa à 140 kPa est en cours. L'étalon de transfert est une balance de pression spéciale capable de fonctionner en mode absolu (différence de pression par rapport au vide) et en mode relatif (différence de pression par rapport à l'atmosphère ambiante). Neuf laboratoires ont participé à cette comparaison ; trois autres s'y joindront à l'avenir. Quatre autres laboratoires ont exprimé le souhait de prendre part à cette comparaison. Les résultats actuellement en notre possession montrent que :

1. Les différences entre les valeurs moyennes obtenues par les participants sont bien supérieures aux incertitudes, d'après la dispersion des valeurs obtenues par chaque laboratoire et d'après les écarts-types communiqués par les laboratoires.

2. La répétabilité des résultats est meilleure aux hautes pressions qu'aux basses pressions.

3. Rien ne met en évidence l'existence d'une variation significative de la surface effective en fonction de la pression ou du temps.

4. Une très petite différence a été observée entre les valeurs moyennes, selon que la balance fonctionnait en mode absolu ou en mode relatif. Les comparaisons futures pourraient être étendues vers le haut jusqu'à 1 MPa ou vers le bas jusqu'à 1 kPa.

### *Basses pressions*

Les étalons utilisés pour la première comparaison internationale de pression dans le domaine de 1 Pa à 1 kPa sont des jauges à diaphragme à variation de capacité. Elles se révèlent insuffisamment stables en raison de défauts d'étanchéité et d'instabilités thermiques. Les résultats obtenus montrent des différences telles qu'un remplacement de l'étalon de transfert responsable de cette dispersion semble opportun. Au vu de ces résultats, qui ont été analysés par les laboratoires dont l'équipement a été utilisé dans cette comparaison, il a été décidé de commencer une autre comparaison internationale en 1992.

En ce qui concerne le domaine des très basses pressions, on a décidé de choisir un étalon de transfert convenable pour des comparaisons à une pression de  $10^{-7}$  Pa ; ce pourrait être une jauge à ionisation.

### *Balances*

Les essais actuellement effectués au BIPM et dans certains laboratoires nationaux dans le but d'évaluer les performances de la balance Mettler HK 1000 MC ont conduit à des améliorations de cette balance. La répétabilité actuellement obtenue dans une comparaison de plusieurs étalons de 1 kg est caractérisée par un écart-type de 0,4  $\mu$ g et la reproductibilité par un écart-type de 1,5  $\mu$ g. Le BIPM construit une deuxième balance à suspensions flexibles, d'une conception analogue à la première, qui devrait permettre d'atteindre un écart-type de l'ordre de 0,1  $\mu$ g dans les comparaisons dans l'air des étalons de masse de 1 kilogramme. Cette nouvelle balance à suspensions flexibles devrait remplacer dans l'avenir la balance NBS-2. D'autres laboratoires nationaux poursuivent des études pour améliorer la performance des comparateurs de masse existants, développer de nouveaux types de comparateurs, améliorer les méthodes de pesée ou établir de nouvelles méthodes de mesure.

## 9. La seconde et le Temps atomique international

M. KOVALEVSKY présente son rapport et donne en particulier lecture du projet de résolution A concernant les étalons de temps et les comparaisons de temps. Il rappelle au préalable que les projets de résolutions seront soumis au vote de la Conférence au cours de la séance du jeudi 3 octobre 1991.

La 18<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures a approuvé la prise en charge, par le Bureau international des poids et mesures (BIPM), de l'établissement et de la diffusion du Temps atomique international (TAI) et, par extension, du Temps universel coordonné (UTC) qui n'en diffère que d'un nombre entier de secondes. Cette prise de responsabilités avait été préparée depuis 1985 par le transfert progressif de ces activités du Bureau international de l'heure vers le BIPM. C'est au 1<sup>er</sup> janvier 1988 que ce dernier a été totalement investi de ces responsabilités et s'est trouvé à exercer seul l'ensemble des travaux que cette tâche implique.

Un peu plus d'un an après, en avril 1989, le Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS) s'est réuni pour faire une première évaluation de ce transfert de tâches et pour étudier les conditions dans lesquelles il serait désirable que ce travail se déroule afin de satisfaire au mieux aux exigences métrologiques auxquelles doit obéir l'échelle de temps TAI.

Il faut dès l'abord constater que le problème de la conservation de l'unité de temps — la seconde — est différent de celui qui se pose pour les autres unités fondamentales dont le BIPM a la charge. Il n'y a en effet pas d'étalon de la seconde que l'on puisse conserver. Ce qui est réalisé, c'est d'abord une fréquence étalon (césium) dans un certain nombre de laboratoires. Mais, d'une part, ces étalons sont à ce point délicats, complexes et fortement dépendants de l'environnement, qu'il ne peut être question de faire des comparaisons par transport d'étalon. Par ailleurs, la construction et l'entretien d'un ou plusieurs de ces étalons sont tellement coûteux en investissement, maintenance et personnel spécialisé, qu'il n'est pas raisonnable que le BIPM construise et entretienne ses propres étalons.

Compte tenu de ces conditions, le Comité consultatif pour la définition de la seconde se devait d'étudier et de proposer la meilleure manière d'arriver au résultat voulu, c'est-à-dire avoir accès à l'unité de temps et en assurer la diffusion. Cet accès est obtenu par la réalisation de l'échelle de Temps atomique international (TAI) fondée sur la matérialisation de la seconde par des étalons primaires de fréquence à césium asservissant des horloges et par sa comparaison avec les échelles de temps construites par divers pays ou laboratoires. D'où les deux volets essentiels des travaux du CCDS : veiller à l'amélioration des étalons primaires de fréquence et assurer l'uniformité et la disponibilité aux usagers de l'échelle TAI en proposant de donner au BIPM tous les moyens nécessaires pour accomplir au mieux sa tâche, maintenant et dans l'avenir.

### *Étalons primaires de fréquence et réalisation de l'unité de temps*

Au cours des quatre dernières années, de nombreux laboratoires ont travaillé dans le domaine des étalons de fréquence à césium. Plusieurs étalons primaires sont en construction, selon des conceptions souvent nouvelles, notamment par l'utilisation du pompage optique. On espère obtenir une exactitude de l'ordre de  $10^{-14}$ . La mise en service de nouvelles horloges primaires devient de plus en plus importante et urgente car certains étalons, existant depuis cinq ou même dix ans, sont devenus moins bons

et d'autres ont été arrêtés. Il s'ensuit que depuis trois ans la conformité de l'intervalle unitaire du TAI avec la seconde du SI est assurée presque exclusivement par deux horloges primaires de la Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) qui sont de loin les plus stables et les plus exactes. Cette situation, toutefois, n'est pas satisfaisante et il est nécessaire que d'autres étalons, tout à fait indépendants, puissent contribuer avec un poids similaire afin de s'assurer contre des biais systématiques qui pourraient exister et qui, dans la situation actuelle, échappent à l'analyse. C'est la raison pour laquelle le CCDS a souhaité insister tout particulièrement sur la nécessité d'améliorer les étalons primaires à césium existants et d'en construire de nouveaux. C'est d'ailleurs dans le sens de la novation dans la conception de ces étalons qu'il faut aller pour que de nouveaux progrès soient réalisés, alors que les quelques années qui viennent de s'écouler ont montré une certaine stagnation dans ce domaine. Le CIPM a estimé que ce point était important et ce souhait est inclus dans le projet de résolution A « Étalons de temps et comparaisons de temps » qui est soumis à la Conférence générale.

La course vers une plus grande stabilité à long terme et, par voie de conséquence, vers une meilleure représentation de la seconde, ne résulte pas d'un état d'esprit « sportif » de faire toujours mieux. Il y a des besoins réels et le CCDS a discuté de ces besoins dans le domaine de la radio-interférométrie à longue base et, surtout, pour le chronométrage des pulsars dont les applications vont d'une amélioration considérable des éléments de l'orbite terrestre à la détection d'ondes gravitationnelles. Des stabilités à long terme de l'ordre de  $10^{-16}$  des échelles de temps seraient nécessaires. Remarquons cependant que, si les pulsars peuvent constituer des horloges de grande stabilité, la dérive de leurs périodes ne permet pas d'envisager actuellement de les considérer comme des étalons de temps.

Cette recherche d'une plus grande stabilité justifie les nombreux travaux répertoriés par le CCDS pour essayer d'utiliser d'autres éléments que le césium. De nombreux travaux se poursuivent ainsi sur les masers à hydrogène dont la stabilité relative est de l'ordre de  $10^{-15}$  par jour. D'autres recherches ont lieu sur l'utilisation des ions  $Ba^+$ ,  $Be^+$ ,  $Mg^+$  et  $Hg^+$  qui seraient susceptibles d'assurer dans l'avenir le relais. Un autre objectif est aussi de relier les étalons micro-onde à des étalons dans le visible, ce qui est aussi important pour la réalisation du mètre.

Comme on l'a déjà indiqué, le BIPM ne peut pas prétendre actuellement réaliser un étalon de fréquence. En revanche, il a un rôle essentiel à jouer dans la comparaison d'étalons, rôle qu'il peut et doit avoir en étant un centre actif de comparaison des échelles de temps.

#### *Comparaison des échelles de temps*

S'il y a eu une certaine pause dans les progrès dans la réalisation en laboratoire de la seconde du SI, en revanche les techniques de comparaison d'horloges à distance ont fait d'immenses progrès ces dernières années avec un gain de un à deux ordres de grandeur en précision. Cette avancée a été le résultat des travaux qui ont été effectués ces dernières années sur l'utilisation du « Global Positioning System » (GPS) pour la comparaison des horloges. Ce point a été longuement discuté par le CCDS ainsi que par le Groupe de travail sur l'amélioration du TAI qui s'est réuni sous son égide. Il apparaît maintenant que, en mode de fonctionnement normal du GPS, on peut obtenir une précision meilleure que la nanoseconde à condition de prendre un certain nombre de précautions telles que l'observation sur les deux fréquences pour corriger les effets de réfraction ionosphérique, une connaissance précise des

positions des antennes dans un système de référence terrestre unique et une grande stabilité des conditions d'environnement des récepteurs. La condition relative aux liaisons géodésiques entre les antennes a été jugée suffisamment importante par le CIPM pour être proposée dans le projet de résolution à cette Conférence générale.

Une difficulté majeure risque de se produire si le système GPS est mis en situation de dégradation volontaire pour tous les usagers à l'exception des récepteurs militaires pouvant travailler en mode d'accès sélectif (Selective Availability). Les indications de l'horloge de bord, ainsi que les éphémérides transmises, sont alors inexactes. Plusieurs solutions ont été envisagées par le CCDS au cas où l'accès sélectif serait mis en œuvre, notamment pour obtenir *a posteriori* des éphémérides exactes.

La plupart des laboratoires créant une échelle de temps sont maintenant équipés de récepteurs GPS et le BIPM assure, sur la demande du CCDS, l'organisation et la coordination des observations de ces satellites puis leur traitement global dans le cadre de la construction de l'échelle du TAI. Le BIPM doit également effectuer les études susceptibles d'améliorer la qualité des comparaisons d'horloges. C'est ce qu'il a déjà fait en construisant, sous la direction d'un ingénieur japonais stagiaire, un récepteur à deux voies qui a permis d'obtenir une correction plus précise des effets ionosphériques. Il doit continuer ce type d'activité et c'est la raison pour laquelle le CCDS a estimé nécessaire que le BIPM dispose d'horloges en plus de récepteurs GPS pour pouvoir réaliser sur place les essais et les expériences relatives aux procédés de synchronisation et de comparaison des échelles de temps. Il apparaît d'ailleurs de toute façon indispensable que, chargé de collationner et de synthétiser les résultats des comparaisons d'horloges, le BIPM soit expert dans les techniques utilisées pour les obtenir et ne soit pas dépendant d'un laboratoire national. C'est pour cette raison que la demande budgétaire pour les années 1993-1996 comprend une ligne exceptionnelle pour installer et entretenir une station horaire. En attendant, le BIPM s'est déjà engagé dans cette voie grâce au prêt d'une horloge à césium commerciale accordé par l'Observatoire Naval de Washington.

Un système analogue au GPS, le Global Navigation Satellite System (GLONASS), mis en œuvre par l'URSS, permet le même type de comparaison de temps. Le CCDS souhaite que ce système soit utilisé en parallèle avec le GPS, en particulier pour assurer la comparaison précise du TAI avec l'échelle de temps soviétique UTC(SU) stabilisée grâce à de nombreux masers à hydrogène et fondée sur plusieurs étalons à césium. Sa participation avec un poids notable au TAI serait très utile, d'où l'importance de GLONASS comme nouvel outil de comparaison.

À ce propos, le CCDS a passé en revue les autres méthodes satellitaires de comparaison de temps, préconisées par la Résolution 4 de la 18<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures. Un certain nombre de programmes sont en cours, tels que l'expérience LASSO de synchronisation par tirs de lasers sur satellites géostationnaires, des essais de transmissions à partir du satellite MARECS-B ou l'utilisation des modems MITREX (Microwave Intercomparison Time and Range Experiment) dans le cadre d'un programme EUROMET et qui permet une précision de l'ordre de la nanoseconde. Cependant, pour cette troisième technique, il y a des difficultés pour obtenir l'accord des diverses administrations nationales concernées, accord nécessaire pour faire des mesures systématiques.

En ce qui concerne l'établissement du TAI auquel participent plus de 40 laboratoires et plus de 160 horloges, le CCDS s'est penché sur les algorithmes utilisés et a encouragé le BIPM à continuer l'étude de nouveaux algorithmes et leur expérimentation

sur des données réelles. En particulier, en plus de la pondération fondée sur la stabilité à long terme, une pondération secondaire fondée sur la stabilité à court terme est étudiée. L'analyse des résidus de chacune des horloges a montré qu'il existe des corrélations très significatives entre les variations de fréquence de certaines horloges. Ce point reste préoccupant et le CCDS a demandé au BIPM de l'étudier plus en profondeur. Parallèlement, pour améliorer l'indépendance statistique des horloges et, de façon générale, pour pouvoir interpréter les variations de fréquence de celles-ci, il est nécessaire que les laboratoires évitent au maximum de modifier les conditions d'environnement des horloges et, si de telles modifications se produisent, que le BIPM en soit informé de manière détaillée. Ces précautions peuvent sans conteste améliorer la qualité du TAI et cette recommandation du CCDS est reprise dans le projet de résolution.

Enfin, si le relèvement de la compétence technique du BIPM, est, comme nous l'avons vu, nécessaire, il en est de même pour sa compétence théorique en particulier dans le domaine de la relativité. L'exactitude relative des étalons de temps est déjà proche de  $10^{-14}$ . Comme ces étalons progressent et que de nombreux utilisateurs de leur ultime qualité sont en vue, il faut viser une exactitude relative de  $10^{-16}$ , ou même meilleure, dans l'application de la théorie de la relativité. C'est au niveau de  $10^{-16}$  que commencent à apparaître des complexités, comme les effets relativistes du second ordre, auxquelles le BIPM devra faire face. C'est pourquoi un effort particulier est envisagé pour assurer que cette nouvelle compétence se développe au BIPM. Cela va d'ailleurs de pair avec une compétence accrue dans les domaines où ce type de précision dans l'utilisation des échelles de temps est nécessaire, notamment en radio-interférométrie à longue base et en physique des pulsars.

En conclusion, on peut affirmer que le transfert au BIPM des tâches de construction de l'échelle TAI et de maintenance de son exactitude à l'aide des comparaisons avec les étalons primaires à césium est un succès complet. Le Groupe de travail sur l'amélioration du TAI, qui comprend un certain nombre d'utilisateurs de cette échelle de temps aussi bien que des membres du CCDS, a tenu à souligner cette réussite. Mais, au fur et à mesure des avancées techniques, les tâches du BIPM deviennent plus lourdes et exigent un accroissement et une diversification de ses compétences. La qualité du personnel embauché à la section du temps du BIPM ne laisse planer aucun doute sur sa capacité de répondre intellectuellement à ces besoins. Le CCDS et le CIPM souhaitent que la Conférence générale des poids et mesures leur en donne également les moyens matériels par l'acquisition et la maintenance d'une station horaire performante.

M. MARÉCHAL souligne l'importance des problèmes soulevés par le CCDS et le travail du BIPM dans le domaine du temps. Toutefois, le rapport de M. Kovalevsky ne donne lieu à aucun commentaire ni discussion.

## 10. Étalons électriques

Par suite de la démission de E. Ambler, ancien directeur du NIST, le Comité consultatif d'électricité se trouvait sans président. Le rapport a donc été préparé par M. D. Kind, président *ad interim* mais c'est M. SKÁKALA, vice-président du CIPM, qui le présente et qui en particulier donne lecture du projet de résolution B concernant l'effet Josephson et l'effet Hall quantique.

La réalisation directe des unités de force électromotrice et de résistance électrique du Système international d'unités, conformément à leur définition, est une tâche longue et difficile. Sur la base de tels travaux, aboutissement de nombreuses années de travail, le Comité consultatif d'électricité (CCE) a estimé que le volt et l'ohm sont à présent réalisés avec une incertitude relative de quelques  $10^{-7}$ . La reproductibilité que l'on atteint maintenant dans la pratique de la métrologie électrique est meilleure encore, d'un ou deux ordres de grandeur, grâce à l'utilisation d'étalons de référence fondés sur l'effet Josephson et l'effet Hall quantique.

La découverte de l'effet Josephson en 1962 et de l'effet Hall quantique en 1980 et leur application au domaine de la métrologie électrique ont entraîné des changements de grande portée dans les méthodes de conservation des unités électriques. L'expérience acquise au fil des années pour utiliser l'effet Josephson en métrologie a permis de gagner un temps considérable lors de la mise en pratique de l'effet Hall quantique, depuis sa découverte. Lors de la 18<sup>e</sup> Conférence générale en 1987, il était déjà clair que le moment était venu de parvenir à un accord mondial concernant la mise en pratique de ces deux effets quantiques macroscopiques, afin de fournir des représentations très reproductibles du volt et de l'ohm, uniformes pour tous les laboratoires et en accord avec le SI. Dans sa Résolution 6, la 18<sup>e</sup> Conférence générale a chargé le Comité international des poids et mesures (CIPM) de prendre les mesures nécessaires dans ce but. Le CIPM avait demandé au CCE d'étudier en détail cette question afin de le guider dans ses décisions. Des réunions officielles d'experts ont eu lieu en 1984, en 1986 et en 1988 à l'occasion des « Conference on Precision Electromagnetic Measurements » qui se sont tenues successivement à Delft, Washington et Tsukuba.

Parallèlement au développement rapide des techniques associées à l'effet Josephson et à l'effet Hall quantique, d'importantes réalisations directes du volt et de l'ohm du Système international d'unités ont été menées à bien durant ces années. De nombreuses informations utiles sur la cohérence des diverses réalisations des unités électriques ont été publiées par CODATA dans *The 1986 Adjustment of the Fundamental Physical Constants*. Le CIPM a chargé le CCE de deux tâches : la première était de choisir les valeurs appropriées pour les constantes de l'effet Josephson et de l'effet Hall quantique utilisées pour réaliser les étalons de force électromotrice et de résistance ; la deuxième tâche était d'aider les laboratoires à assurer l'uniformité mondiale des mesures et de la terminologie associée, dans la mise en pratique de ces effets.

Le CCE s'est réuni au Pavillon de Breteuil en septembre 1988 sous la présidence de M. Ambler ; il a examiné les rapports des deux groupes de travail *ad hoc* chargés par le CCE de préparer des projets de recommandations sur l'effet Josephson et l'effet Hall quantique. Ces deux groupes de travail ont proposé conjointement des projets de recommandations, qui ont été adoptés par le CCE puis peu après par le CIPM, avec quelques modifications mineures. Ces recommandations, Recommandation 1 (CI-1988) et Recommandation 2 (CI-1988), sont accompagnées de déclarations présentant les directives du CCE sur la façon de les mettre en œuvre, déclarations qui ont été approuvées par le CIPM. Il a été décidé de suivre les suggestions des groupes de travail du CCE et d'utiliser le terme de *constante de Josephson*, avec le symbole  $K_J$ , pour désigner le quotient de la fréquence par la tension, et d'utiliser  $K_{J,90}$  comme symbole de la valeur recommandée par convention. De même, le terme *constante de von Klitzing*, avec le symbole  $R_K$ , a été adopté pour désigner la résistance de Hall quantifiée correspondant au plateau de nombre quantique  $i = 1$ , accompagné du symbole  $R_{K,90}$  pour désigner la valeur recommandée par convention pour cette résistance. Ni le symbole  $K_J$  ni le symbole  $R_K$  ne sont destinés à représenter la

combinaison des constantes physiques fondamentales  $2e/h$  ou  $h/e^2$ , car cela impliquerait que le mécanisme physique de ces effets est entièrement compris, ce qui, du moins à présent, n'est pas encore le cas.

Le CCE, dans ses projets de recommandations, et le CIPM, lors de l'adoption des valeurs convenues de  $K_{J-90}$  et de  $R_{K-90}$ , ont tenu à préciser que ces recommandations ne constituaient pas une redéfinition des unités SI. Bien que les valeurs convenues  $K_{J-90}$  et  $R_{K-90}$  soient en accord avec le SI, elles ne peuvent servir à définir le volt et l'ohm (c'est-à-dire les unités de force électromotrice et de résistance électrique actuelles du Système international d'unités). Cela aurait pour conséquence de changer le statut de la constante  $\mu_0$ , qui n'aurait plus une valeur définie exactement (et donc rendrait caduque la définition de l'ampère), et de rendre les unités électriques incompatibles avec la définition du kilogramme et des unités qui en dérivent. Pour éviter toute méprise, le CCE et le CIPM ont ajouté que les symboles des grandeurs force électromotrice (potentiel électrique, différence de potentiel électrique) et résistance électrique, ainsi que ceux du volt et de l'ohm, ne devraient pas être modifiés par l'adjonction d'indices désignant des dates ou des laboratoires particuliers. Des conseils complémentaires concernant la mise en pratique des Recommandations 1 (CI-1988) et 2 (CI-1988) ont été donnés, ainsi qu'une note sur la façon de rédiger les certificats d'étalonnage. En complément aux recommandations du CIPM et aux déclarations du CCE, deux documents ont été préparés : *Technical Guidelines for Reliable Measurements of the Quantized Hall Resistance* et *New International Electrical Reference Standards Based on the Josephson and Quantum Hall Effects*. Ces deux documents ont été publiés dans *Metrologia*, 1989, **26**, pp. 47-62 et 63-68.

Les Recommandations 1 et 2 (CI-1988) du CIPM sont entrées en vigueur au 1<sup>er</sup> janvier 1990, date choisie aussi pour la mise en pratique de l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90). L'utilisation par les laboratoires nationaux et le BIPM des valeurs recommandées  $K_{J-90}$  et  $R_{K-90}$  pour les nouveaux étalons de référence de force électromotrice et de résistance ont immédiatement entraîné une amélioration importante de l'uniformité mondiale des mesures de ces grandeurs. Dans la courte période qui s'est écoulée depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1990, la reproductibilité de ces étalons a été encore améliorée. Il y a maintenant au BIPM et dans d'autres laboratoires des étalons de référence de force électromotrice de 1 volt, fondés sur des réseaux de jonctions de Josephson, d'une reproductibilité meilleure que  $1 \times 10^{-9}$ . Des étalons de référence de résistance fondés sur l'effet Hall quantique sont maintenant réalisés au BIPM et dans d'autres laboratoires avec une reproductibilité de  $1 \times 10^{-8}$  ou mieux.

On ne doit pas oublier que ces étalons de référence, quoique très reproductibles, ont une incertitude associée de  $4 \times 10^{-7}$  et de  $2 \times 10^{-7}$  respectivement, par rapport au volt et à l'ohm tels qu'ils sont définis dans le SI. Seules de nouvelles réalisations absolues des unités du Système international d'unités permettront de réduire les incertitudes associées à ces valeurs, ce qui sera long et difficile. L'effet Josephson et l'effet Hall quantique permettent de réaliser des étalons de référence du volt et de l'ohm avec une reproductibilité supérieure d'un ou deux ordres de grandeur à l'exactitude avec laquelle on connaît leur valeur en unités SI, c'est justement pour cette raison que les valeurs de  $K_{J-90}$  et  $R_{K-90}$  ont été adoptées. Si l'on admet que les constantes  $K_J$  et  $R_K$  sont égales à  $2e/h$  et  $h/e^2$ , les valeurs choisies pour  $K_{J-90}$  et  $R_{K-90}$  sont bien en accord avec les valeurs publiées en 1986 par CODATA dans *The 1986 Adjustment of the Fundamental Physical Constants*. Les nouvelles valeurs de  $2e/h$  et  $h/e^2$ , calculées d'après des ajustements ultérieurs, ne devraient pas entraîner de changements dans les valeurs qui ont été adoptées pour  $K_{J-90}$  et  $R_{K-90}$ , et d'ailleurs ce ne serait pas souhaitable.

En 1987, pour préparer l'adoption de la valeur de  $R_{K-90}$ , le BIPM a organisé une comparaison internationale d'étalons de résistance de  $1\ \Omega$ . Les résultats de cette comparaison ont été importants pour mettre en évidence l'accord entre les mesures de  $R_K$  en fonction de  $\Omega_{69-B1}$ . Douze laboratoires qui utilisaient déjà l'effet Hall quantique pour suivre la dérive de leurs étalons de résistance ont participé à cette comparaison. Parmi ceux-ci, six ont obtenu une incertitude égale ou inférieure à  $3,6 \times 10^{-8}$ . Pour cinq des six laboratoires, l'accord entre les valeurs de  $R_K$  est excellent; la dispersion totale des résultats, exprimée en valeur relative, est de  $6,6 \times 10^{-8}$ . La valeur de  $\Omega_{69-B1}$  calculée d'après les résultats de la comparaison coïncide à  $5 \times 10^{-9}\ \Omega$  près avec sa valeur extrapolée d'après sa dérive, elle-même déduite des comparaisons effectuées depuis 1964 avec le condensateur calculable du CSIRO. Après l'adoption de  $R_{K-90}$ , une nouvelle comparaison internationale d'étalons de résistance de  $1\ \Omega$  et  $10\ 000\ \Omega$  a eu lieu au BIPM à la fin de 1990. Dix des dix-huit laboratoires qui ont participé à cette comparaison ont utilisé l'effet Hall quantique comme étalon de référence. Les résultats moyens de ces dix laboratoires diffèrent de ceux du BIPM de  $(-2,6 \pm 1,5) \times 10^{-8}$  pour les étalons de  $1\ \Omega$  et de  $(-1,1 \pm 1,8) \times 10^{-8}$  pour les étalons de  $10\ 000\ \Omega$ . Ces excellents résultats confirment l'accord entre les étalons de résistance fondés sur l'effet Hall quantique, ainsi que l'exactitude des mesures de rapport de résistance.

En 1990, le BIPM a pris l'initiative d'organiser, conjointement avec le LCIE et EUROMET, la production par les Laboratoires d'électronique Philips d'un grand nombre d'échantillons pour l'utilisation métrologique de l'effet Hall quantique. Le BIPM a obtenu environ deux cents échantillons et les a mis à la disposition des laboratoires membres du CCE.

Le Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences du CCE continue à organiser de nombreuses comparaisons internationales. Depuis la dernière Conférence générale quatre comparaisons ont été terminées, quatre ont été abandonnées et dix-huit sont en cours.

Une importante réunion conjointe du CCE et du Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR) a eu lieu sur le thème de la métrologie des fibres optiques. Les conclusions de cette réunion sont présentées dans le rapport du président du CCPR.

M. MARÉCHAL remercie M. Skákala et sollicite des commentaires. M. CLAPHAM (Royaume-Uni) souhaite faire deux observations. La première est d'ordre fondamental. Il a été rappelé dans le rapport sur les étalons électriques que c'est au 1<sup>er</sup> janvier 1990 que sont entrées en vigueur les valeurs adoptées par convention pour les constantes de Josephson et de von Klitzing à utiliser dans les réalisations pratiques. De nombreux laboratoires ont déjà réajusté leurs étalons et modifié leurs échelles pratiques en conséquence. Lorsque le CIPM a recommandé ces valeurs, il était implicite qu'aucune modification ne risquait d'intervenir avant un bon nombre d'années. Pour des raisons évidentes, des modifications fréquentes ne sont pas de bonnes modifications. Or, le projet de résolution B demande aux laboratoires de travailler à réduire les incertitudes sur la connaissance des valeurs des constantes en question. M. CLAPHAM craint en conséquence que cela ne risque d'entraîner une modification des valeurs convenues alors qu'au moment de l'adoption de celles-ci, rien de tel n'était envisagé dans un avenir prévisible.

La seconde remarque de M. Clapham est pour rappeler que le Royaume-Uni célèbre actuellement le bicentenaire de Michael Faraday (né à Londres le 22 septembre 1791). Il souligne que, puisque maintenant on commence à parler de la possibilité d'une nouvelle définition du kilogramme fondée sur des champs de forces électromagnétiques, on ne peut à cette occasion que saluer le travail de pionnier de Michael Faraday qui, il y a deux siècles, a ouvert la voie des recherches dans le domaine de l'électromagnétisme.

M. KOVALEVSKY répond en acquiesçant à la seconde remarque faite par M. Clapham. Toutefois, en ce qui concerne les constantes de Josephson et de von Klitzing, il tient à souligner que dans le rapport, il a bien été spécifié qu'on ne saurait envisager actuellement de changement dans un avenir prévisible. Un tel changement ne serait en aucune manière souhaitable.

M. LYONS approuve entièrement l'intervention de M. Clapham.

M. KIND rappelle qu'il ne faut surtout pas perdre de vue le problème de la différence qu'il peut y avoir entre une valeur admise par convention et la « vraie » valeur d'une constante dans le SI. Il souligne que dans cette affaire les milieux industriels se faisaient pressants pour avoir des représentations quantiques du volt et de l'ohm qui soient fondées sur des effets macroscopiques. La décision concernant les valeurs des constantes qui permettent de réaliser ces unités sur ces bases répond à leur demande. Ils sont satisfaits. Il n'en demeure pas moins qu'il reste important de chercher à connaître avec une plus grande exactitude la différence qui subsiste entre  $K_{J-90}$  et  $K_J$  ou entre  $R_{K-90}$  et  $R_K$ .

Par ailleurs, M. KIND fait remarquer que, comme ont pu le constater les délégués, le BIPM a fait le nécessaire pour fournir les laboratoires en instruments qui sont essentiels comme étalons de transfert. Le BIPM a mis au point et fourni des échantillons utilisés pour l'effet Hall quantique. Les délégués pourront aussi constater que le BIPM entreprend une action du même ordre pour des lampes étalons ainsi que pour des tubes laser. En effet, lorsque les fournisseurs industriels sont réticents pour répondre à la demande en matériel spécifique faite par des laboratoires isolés, le BIPM peut apporter son aide en passant des commandes groupées. Il paraît important d'appuyer ce type d'intervention de la part du BIPM. Cela permet de faire profiter les laboratoires nationaux des découvertes les plus récentes.

## 11. Température, Échelle internationale de température de 1990

M. MARÉCHAL donne la parole à M. PRESTON-THOMAS, président du Comité consultatif de thermométrie, pour la présentation de son rapport.

L'activité du Comité consultatif de thermométrie (CCT), au cours des quatre années écoulées depuis la 18<sup>e</sup> Conférence générale (1987), peut se résumer comme suit : poursuite et achèvement des travaux entrepris depuis de longues années pour élaborer une échelle notablement meilleure et susceptible de remplacer l'Échelle internationale pratique de température de 1968 (EIP-68), ainsi que des documents complémentaires

destinés à faciliter les mesures pratiques de température en conformité avec la nouvelle échelle. Celle-ci, l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90) a été adoptée par le CIPM en octobre 1989 ; elle est entrée en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 1990. Les documents complémentaires, *Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990* et *Techniques for Approximating the International Temperature Scale of 1990*, ont été publiés respectivement en décembre 1990 et en juillet 1990. Diverses recherches effectuées en vue de l'élaboration de l'EIT-90 ont fait l'objet d'articles publiés dans des revues scientifiques ou avec le rapport de la 17<sup>e</sup> session du CCT qui s'est tenue en 1989. Je pense que plusieurs autres publications paraîtront en 1992, en particulier à l'occasion du septième symposium de Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry qui doit avoir lieu à Toronto au mois d'avril 1992.

Lors de la 18<sup>e</sup> Conférence générale, j'ai expliqué qu'en 1984 l'élaboration d'une nouvelle échelle s'était heurtée à des difficultés qui ne pouvaient être résolues à l'époque mais qui avaient en principe été surmontées en 1987. De ce fait, en 1987, le CCT envisageait d'achever l'échelle un an environ avant sa promulgation en janvier 1990.

Il s'est avéré que les difficultés mentionnées étaient encore sous-estimées. Malgré un énorme travail mené avec acharnement par des personnes résolues au sein des quatre groupes de travail qui existaient et qui étaient chargés de problèmes précis, ainsi qu'au sein d'un groupe de travail *ad hoc* qui s'est réuni pour discuter et évaluer les progrès et les propositions, il demeurait encore des questions à résoudre et des décisions à prendre lors de la réunion du CCT en septembre 1989.

Que le processus se soit révélé aussi lent, en dépit des gros efforts déployés par beaucoup de gens, venait du nombre et de l'importance des changements et des innovations qui s'avéraient nécessaires si l'EIT-90 devait éviter les défauts des échelles précédentes. Les améliorations les plus importantes sont telles que l'EIT-90 :

-- s'étend vers des températures plus basses, 0,65 K au lieu de 13,8 K environ pour l'EIPT-68, et remplace donc aussi l'Échelle provisoire de température de 1976 (EPT-76) entre 0,65 K et 30 K ;

-- est en bien meilleur accord avec les températures thermodynamiques correspondantes ;

-- a une continuité et une précision améliorées ;

-- est divisée en domaines et sous-domaines qui se recouvrent partiellement et dans certains domaines offre des définitions distinctes mais pratiquement équivalentes ;

-- comprend de nouvelles versions des échelles de pression de vapeur saturante de l'hélium qui ne sont pas seulement recommandées mais font partie intégrante de l'EIT-90 ;

-- fait appel au thermomètre à gaz, étalonné à trois points fixes, comme l'un des instruments de définition ;

-- reporte la limite supérieure d'utilisation du thermomètre à résistance de platine comme instrument de définition au point de fusion de l'argent (962 °C environ), au lieu de 630 °C qui était la limite supérieure dans l'EIPT-68 ;

-- élimine le thermocouple Pt/10 % Rh-Pt (qui présente au mieux une exactitude de 0,2 °C) comme instrument de définition (éliminant en même temps la discontinuité de pente qui existait dans l'EIPT-68 à 630 °C, point de jonction entre le domaine du thermomètre à résistance de platine et le domaine du thermocouple) ;

— a pour limite inférieure du domaine fondé sur la loi du rayonnement de Planck le point de fusion de l'argent au lieu du point de fusion de l'or et permet de choisir le point de l'argent, de l'or ou du cuivre comme point de référence pour ce domaine.

L'un des principes qui ont présidé à l'élaboration de l'EIT-90 était que celle-ci devrait donner à l'utilisateur autant de choix pour sa réalisation que le permet une échelle exacte et reproductible. C'est pourquoi l'échelle comporte de nombreux sous-domaines ; à l'intérieur de tous ces sous-domaines, sauf un,  $T_{90}$  est défini sans utiliser de points d'étalonnage extérieurs au domaine. Ainsi, si l'on veut étalonner un thermomètre à résistance de platine sur la totalité du domaine des basses températures entre 13,8 K environ et 273,16 K, il faut utiliser les huit points d'étalonnage de ce domaine ; en revanche, si on n'a besoin d'un étalonnage qu'entre le point triple de l'argon (84 K environ) et le point triple de l'eau, les trois points d'étalonnage de ce domaine suffisent, c'est-à-dire 84 K, 234 K environ (point triple du mercure) et 273,16 K. De même, au-dessus de 0 °C, on peut étalonner un thermomètre entre 0 °C et 30 °C en utilisant seulement le point triple de l'eau et le point de fusion du gallium. Ce domaine offre la façon la plus simple qui soit d'obtenir des mesures thermométriques de très grande exactitude au voisinage de la température ambiante ; il permet à l'utilisateur d'éviter les soucis et les dépenses occasionnés par l'installation de points d'étalonnage à des températures situées en dehors du domaine concerné (jusqu'à 419 °C ou davantage avec les échelles précédentes) ; de plus, il permet de conserver le thermomètre dans les meilleures conditions possibles en évitant de le porter nettement au-delà de sa température normale d'utilisation. Le prix de cette souplesse appréciable de l'EIT-90 est un éventuel petit désaccord entre les sous-domaines et une non-unicité accrue par rapport à une échelle ne présentant pas de domaines ou de sous-domaines qui se recouvrent partiellement. A l'heure actuelle, cette perte de précision est très légère, car elle est en grande partie masquée par l'imprécision qui résulte des différences entre thermomètres, en particulier pour les thermomètres à résistance de platine. Si, à l'avenir, de meilleures méthodes de fabrication réduisent nettement ces différences, il conviendra sans doute de modifier les sous-domaines (peut-être d'éliminer celui qui va de 24 K à 273 K) et de changer l'un des points d'étalonnage (le point triple du xénon qui est fort bien placé mais difficile à réaliser pourrait remplacer le point triple du mercure qui est assez mal placé mais facile à réaliser).

Il semble, bien que cela soit peu justifié, que l'on puisse faire deux critiques à l'EIT-90 si on la compare à l'EIPT-68 : un accroissement de complexité (par exemple dix-sept points fixes de définition au lieu de douze) et un accroissement du coût de réalisation (emploi d'un thermomètre à résistance au lieu d'un thermocouple) dans le domaine de température compris entre 630 °C et 962 °C.

Pour ce qui est de la complexité, l'EIT-90 nécessite douze points fixes (les autres sont facultatifs) pour couvrir la totalité du domaine que couvrait l'EIPT-68 (laquelle demandait dix points dont deux au choix) mais elle fournit une plus grande précision (nettement plus grande, d'un facteur de l'ordre de cinquante, dans le domaine compris entre 630 °C et 962 °C). De plus, l'EIT-90 a une limite inférieure située à 0,65 K, au lieu de 13,8 K pour l'EIPT-68, et remplace par conséquent aussi l'EPT-76 et ses onze points fixes (sept en plus de ceux de l'EIPT-68). Il convient également de ne pas oublier que dans bien des cas les sous-domaines de l'EIT-90 permettent d'utiliser un moins grand nombre de points fixes (dans le meilleur cas deux seulement) que lors des mesures correspondantes dans l'EIPT-68.

Le coût du thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures et de son étalonnage jusqu'à 962 °C, compte tenu de l'accroissement d'exactitude d'un facteur cinquante, est effectivement bien plus élevé que celui du thermocouple Pt-Rh/Pt dans l'EIPT-68, entre 630 °C et 1 064 °C. Toutefois, on dispose maintenant d'un thermocouple Au/Pt pour couvrir le domaine compris entre 630 °C et 1 000 °C ; cet instrument, bien que secondaire, donne un accroissement d'un facteur cinq à dix de l'exactitude jusqu'à 962 °C et de la précision jusqu'à 1 000 °C par rapport à l'instrument primaire de l'EIPT-68. Selon toute vraisemblance on devrait dans l'avenir disposer d'un thermocouple Pd/Pt, dont la précision devrait approcher celle du thermocouple Au/Pt et qui devrait couvrir un domaine allant au moins jusqu'à 1 200 °C. Ces deux thermocouples sont des instruments d'un coût relativement bas. On peut donc obtenir un accroissement notable de l'exactitude par rapport à ce que l'on avait avec l'EIPT-68 sans accroissement du coût, alors que l'EIT-90 elle-même, pour un coût plus élevé, fournit une exactitude plus grande encore.

La dernière contribution importante du CCT à laquelle j'ai fait allusion plus haut concerne les deux documents complémentaires à l'EIT-90. Le document intitulé *Supplementary Information for the ITS-90* donne, en allant plus au fond des choses et, je le pense, sous une forme beaucoup plus directement assimilable que ce n'était le cas pour celui qui l'a précédé, les détails pratiques et les renseignements complémentaires dont les thermométristes ont besoin pour faire des mesures avec l'exactitude la plus élevée possible. Le document intitulé *Techniques for Approximating the ITS-90* est destiné aux quelque 90 % ou plus des thermométristes pour lesquels des méthodes de mesure peu coûteuses et plus courantes suffisent. Ces deux documents, que nous envisageons de mettre à jour tous les cinq à dix ans, constituent à eux deux un vade-mecum qui couvre quasiment tous les problèmes posés par les mesures de température (à l'exception des problèmes très particuliers, comme la mesure de la température des plasmas de l'ordre de millions de degrés ou la mesure de la température d'un simple fil en nylon en cours de refroidissement rapide).

L'EIPT-68 a été adoptée pour répondre à la nécessité impérieuse d'étendre de façon notable la limite inférieure de l'EIPT-48 (de 90 K à 14 K). A l'époque de son adoption on avait conscience de ce qu'à bien des égards elle n'était pas satisfaisante et, depuis 1971, le CCT a travaillé pour préparer son remplacement. Le rythme de progression, délibérément lent au début, est devenu frénétique lors des toutes dernières années. Le travail devrait maintenant, pour un certain temps au moins, se ralentir énormément. Comme je l'ai dit plus haut, la mise à jour des documents complémentaires devra se faire périodiquement ; il se peut aussi que la demande des thermométristes pour une précision accrue conduise à apporter de petits ajustements à l'EIT-90. Jusqu'à maintenant il n'existe pas de moyen pratique et simple pour contrôler la qualité d'un thermomètre à résistance de platine : répondre aux spécifications qui figurent dans l'EIT-90 constitue une indication nécessaire mais non suffisante quant à sa qualité et de meilleurs critères doivent être recherchés. Nous sommes, et nous continuerons d'être, toujours attentifs à l'amélioration de nos connaissances, assez incertaines, des rapports numériques qui existent entre l'échelle internationale et la température thermodynamique. Ces questions et d'autres comparables continueront à retenir l'attention du CCT. Dans les années à venir, je pense que ce comité se réunira à des intervalles de quatre à six ans. Entre-temps, les différents groupes de travail devront poursuivre leur travail de recherche, de compilation et de communication des informations utiles.

À la fin de son rapport M. PRESTON-THOMAS tient à rendre un hommage particulier au travail fourni par les membres des groupes de travail constitués par le Comité consultatif de thermométrie. À son avis, c'est grâce à la somme importante de travail effectué par ces groupes de travail qu'il a été possible d'obtenir une échelle, dont il pense qu'elle présente une grosse amélioration par rapport à la précédente et qu'elle ne nécessitera pas de modifications avant longtemps. C'est un véritable sentiment de gratitude qu'il éprouve pour les membres de ces groupes de travail dont il salue certains qui participent à la présente conférence.

Il donne ensuite lecture du projet de résolution C sur l'Échelle internationale de température de 1990 et les travaux futurs en thermométrie.

La présentation de ce rapport ne donne lieu à aucun commentaire ni aucune discussion.

## 12. Photométrie et radiométrie

La parole est ensuite donnée à M. BLEVIN, président du Comité consultatif de photométrie et radiométrie, pour la présentation de son rapport.

Depuis la 18<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures (CGPM), le Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR) s'est réuni deux fois au Bureau international des poids et mesures (BIPM): la première fois, le 30 septembre 1988, pour une réunion d'information sur les fibres optiques tenue conjointement avec le Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences du Comité consultatif d'électricité (CCE-GTRF), et la seconde fois pour la 12<sup>e</sup> session du CCPR, du 17 au 19 septembre 1990.

### *Photométrie*

En 1987 et au début de 1988, le BIPM et plusieurs laboratoires nationaux ont modifié les valeurs attribuées à leurs étalons photométriques pour tenir compte des résultats de la sixième comparaison des étalons nationaux d'intensité lumineuse et de flux lumineux. Les valeurs des étalons conservés au BIPM ont été mises en accord avec les valeurs moyennes de la comparaison. Les différences résiduelles entre les étalons nationaux et les étalons du BIPM ont été publiées dans *Metrologia*, 1988, **25**, p. 125, afin de permettre aux laboratoires d'appliquer des corrections systématiques lors des comparaisons photométriques entre pays différents. En 1990, le laboratoire national des États-Unis d'Amérique a modifié les valeurs de ses étalons nationaux qui sont ainsi plus proches des valeurs moyennes obtenues lors de la comparaison internationale.

Les deux facteurs critiques dans les comparaisons photométriques sont l'instabilité des lampes et la difficulté de les aligner correctement. Le CCPR a donc décidé de remplacer les lampes étalons par des photorécepteurs au silicium équipés de filtres  $V(\lambda)$  dans la future comparaison d'étalons photométriques nationaux. Cette comparaison est envisagée au cours de la période qui suivra la prochaine session du CCPR, prévue en 1994; en attendant, un groupe de travail a été créé pour recommander des photodiodes et des filtres satisfaisants pour cette comparaison.

### *Radiométrie*

Les instruments les plus exacts pour mesurer une puissance rayonnante sont les radiomètres à substitution électrique utilisés à la température de l'hélium liquide. Ces radiomètres cryogéniques sont de plus en plus utilisés dans les laboratoires nationaux et commencent à être fabriqués industriellement. Ils permettent de déterminer la puissance rayonnante de rayonnements laser avec une incertitude maximale de  $1 \times 10^{-4}$ .

Le CCPR se propose d'effectuer une comparaison de mesures de puissance rayonnante à l'aide des radiomètres cryogéniques disponibles dans les laboratoires nationaux, mais seulement après 1994. Un radiomètre cryogénique portable pourrait être nécessaire pour cette comparaison, aussi a-t-on demandé au BIPM de préparer une recommandation sur l'appareil le mieux approprié.

On peut aussi effectuer des mesures de puissance rayonnante à l'aide de photodiodes au silicium dont on sait calculer l'efficacité quantique interne avec exactitude sur presque tout le spectre visible. De nombreux laboratoires nationaux trouvent cette méthode plus simple et plus économique pour commencer à établir leurs échelles radiométriques.

### *Fibres optiques*

Une réunion conjointe du CCPR et du GTRF du CCE a été organisée par le CIPM pour discuter des besoins métrologiques dans le domaine économiquement important des fibres optiques. On a noté que d'autres organismes internationaux, comme la Commission électrotechnique internationale (CEI) et le Comité consultatif international télégraphique et téléphonique, sont aussi intéressés par ces questions. De plus, de nombreux aspects de cette technologie sont trop spécialisés pour relever de la compétence du CIPM.

Toutefois, le CCPR a estimé que les questions de puissance rayonnante et des grandeurs associées relevaient de sa compétence et le GTRF du CCE a décidé de prendre en considération les mesures d'atténuation optique.

Le CCPR a organisé une comparaison de mesures de puissance rayonnante aux longueurs d'onde de 1 300 nm et 1 550 nm, qui sont très utilisées dans les communications par fibres optiques. Quatre laboratoires nationaux seulement ont participé à la première phase de cette comparaison (les laboratoires des États-Unis d'Amérique, d'Australie, d'Allemagne et du Royaume-Uni). Un accord à  $\pm 0,2\%$  a pu être obtenu, résultat qui satisfait les besoins de l'industrie. Dans un second temps, la comparaison a été étendue à treize laboratoires ; les résultats devraient être disponibles à la fin de 1991.

### *Spectroradiométrie*

Le CCPR a effectué une comparaison de mesures d'éclairement énergétique spectral dans le domaine des longueurs d'onde de 250 nm à 2 400 nm, en utilisant des lampes à filament de tungstène comme sources de rayonnement. Quatorze laboratoires nationaux y ont participé. Les résultats préliminaires ont été présentés à la session de 1990 du CCPR et le rapport final sera disponible en 1991.

Les résultats dans le visible sont légèrement meilleurs que ceux obtenus lors de la précédente comparaison en 1975, mais l'accord dans l'ultraviolet et le proche infrarouge n'est pas bon.

Le CCPR pense qu'il est important d'améliorer l'exactitude dans l'ultraviolet. Lors de la session de 1990, les avantages éventuels de l'emploi de l'anneau de stockage d'électrons d'un synchrotron comme étalon primaire en remplacement du corps noir traditionnel à haute température ont été discutés. Il semble que les synchrotrons soient des étalons primaires bien plus précis, mais en contrepartie ils sont aussi très difficiles à utiliser pour étalonner des étalons secondaires.

Un groupe de travail a été établi pour étudier les techniques de rechange, dont celle du rayonnement du synchrotron, pour améliorer l'uniformité mondiale des mesures spectroradiométriques dans le domaine de l'ultraviolet de 200 nm à 400 nm. Un rapport préliminaire devrait être disponible en 1991.

#### *Mesures de sensibilité spectrale*

Un des besoins fondamentaux de la photométrie et de la radiométrie est de pouvoir mesurer avec exactitude la sensibilité spectrale des photorécepteurs. Les laboratoires nationaux ont tenté dans le passé d'effectuer des comparaisons de mesures de sensibilité spectrale avec un succès très moyen, du fait de l'instabilité des photorécepteurs utilisés. De plus, en raison de son manque d'expérience dans ce domaine, le BIPM n'était pas susceptible de coordonner de telles comparaisons.

Ces difficultés sont maintenant surmontées. Des récepteurs au silicium stables de fabrications différentes existent et, au cours des quatre dernières années, le BIPM s'est équipé du matériel nécessaire et a acquis une compétence qui lui permet d'organiser des comparaisons internationales de photodiodes avec une très grande précision.

Le CCPR a donc décidé d'entreprendre une telle comparaison, avec le BIPM comme laboratoire pilote.

#### *Questions diverses*

Le CCPR est préoccupé par la difficulté qu'éprouvent les laboratoires nationaux à se procurer commercialement des lampes satisfaisantes pour maintenir et comparer leurs étalons photométriques et radiométriques. Un groupe de travail a donc été mis en place, avec le BIPM comme responsable, pour étudier la situation et faire les recommandations qui conviennent.

Au cours des six dernières années, les radiométristes du monde entier, appartenant aux domaines de la métrologie, de la météorologie et de l'astronomie, ont tenu trois réunions spécialisées sur les progrès de la radiométrie optique. La dernière réunion a suivi la 12<sup>e</sup> session du CCPR et s'est tenue à Davos du 20 au 22 septembre 1990. Bien que le CCPR n'en soit pas à proprement parler l'organisateur, il a été proposé d'associer une des réunions futures à la prochaine session du CCPR. Je pense que cela sera bénéfique aux laboratoires nationaux comme au BIPM.

À une question de M. LYONS relative au problème de l'approvisionnement en lampes étalons auprès de sociétés commerciales, M. BLEVIN répond que le CCPR est de plus en plus favorable aux mesures faites à l'aide de récepteurs mais que de toute façon on a besoin de sources stables, utilisables comme étalons. M. Blevin croit savoir qu'au sein du NIST un petit comité a déjà fait de la prospection pour trouver des lampes convenant à cet usage. Il invite le président de ce comité à se joindre au groupe de travail du CCPR chargé de cette recherche.

Dans un autre ordre d'idées M. BLEVIN ajoute que les comptes rendus d'une conférence sur la radiométrie qui s'est tenue l'an dernier à Davos feront l'objet d'un numéro spécial de *Metrologia*. C'est à son avis un premier exemple excellent d'effort susceptible d'accroître le nombre des lecteurs de cette revue.

La séance est levée à 17 heures.

\*  
\* \*

À 18 heures, le Ministre d'État, ministre des Affaires étrangères de la République française, a offert une réception aux participants à la Conférence générale dans les salons du Centre de conférences internationales de l'avenue Kléber.

Toutefois, c'est M. MARÉCHAL, président par délégation de la Conférence et membre de l'Académie des Sciences de Paris, qui, au nom du ministre, absent de Paris, s'est fait le porte-parole des autorités françaises pour accueillir les invités à cette manifestation en rappelant que la France est toujours soucieuse de favoriser au mieux la coopération internationale.

---



---

## VISITE DU BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Mardi 1<sup>er</sup> octobre 1991, à 15 heures

---

Comme de coutume les délégués à la Conférence générale ont été invités à une visite des laboratoires du Bureau international des poids et mesures. Il leur a été ainsi possible de prendre contact avec les physiciens qui, entre autres exemples de leurs travaux, leur ont présenté :

- l'étalon de résistance fondé sur l'effet Hall quantique et l'étalon de potentiel électrique fondé sur un réseau de jonctions de Josephson ;
- l'installation de mesure de  $g$  ;
- les installations de mesure et de comparaison sur les différents lasers utilisés et en cours d'étude ;
- l'état d'avancement de la troisième vérification des prototypes nationaux du kilogramme ainsi que les études des effets de surface sur les étalons de masse en platine iridié, la détermination de la susceptibilité magnétique des matériaux «non-magnétiques» utilisés pour les étalons de masse et la construction des balances ;
- l'étude des propriétés des photodiodes au silicium ;
- les étalons de référence pour la mesure des grandeurs fondamentales en dosimétrie des rayons X et  $\gamma$ , ainsi que la technique de mesure par scintillation liquide ;
- la réception de signaux du GPS et la mesure des retards ionosphériques.

À l'atelier de mécanique, une démonstration sur un tour et une fraiseuse à commande numérique a été présentée.

Exceptionnellement, cette fois-ci, il n'y a pas eu de visite du Dépôt des prototypes, car le Kilogramme international en a provisoirement été extrait avec l'autorisation du CIPM pour la troisième vérification des prototypes nationaux du kilogramme actuellement en cours (*voir* le rapport du président du Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées, p. 49).

\*  
\* \*

Ces visites ont été suivies d'une réception dans les jardins du Pavillon de Breteuil, offerte par le président du Comité international et le directeur du Bureau international. Au cours de cette réception M. DE BOER, ancien secrétaire du CIPM, a reçu les insignes de chevalier de la Légion d'honneur des mains de M. le Professeur J. HAMBURGER, président de l'Académie des Sciences de Paris. M. Hamburger s'est adressé à M. de Boer dans les termes suivants :

« Jan de Boer, si la France a voulu aujourd'hui vous honorer, c'est qu'elle vous tient pour un grand serviteur des sciences, des techniques et même de la vie quotidienne des hommes. Vous avez, en effet, accompli une œuvre immense, comme membre depuis 37 ans du Comité international des poids et mesures et, par conséquent, inspirateur de l'activité du Bureau international des poids et mesures. Depuis 27 ans vous êtes secrétaire du Comité. Vous avez assuré le secrétariat de sept Conférences générales.

« Vous êtes président du Comité consultatif des unités et, à ce titre, vous avez joué un rôle majeur dans l'événement considérable qu'est la mise au point du Système international d'unités. Certes vous nous avez fait souffrir. Il n'a pas toujours été facile d'abandonner nos bons vieux milligrammes pour les millimoles que vous nous imposiez. Les médecins et leurs patients résistent encore et continuent méchamment à parler de la pression sanguine en centimètres ou millimètres de mercure, et non en kilopascals. Les restaurants diététiques s'entêtent à calculer les mets en calories, et non en joules, et les journaux féminins s'obstinent à vanter des régimes hypocaloriques, et non hypojouliens. Mais ce sont des combats d'arrière-garde. Pour les hommes de science, il n'est pas douteux que le Comité que vous présidez a fait une œuvre claire, efficace, intelligente, qui représente un progrès décisif.

« Les Français admirent encore autre chose dans votre personne. D'abord votre merveilleux maniement de notre langue, qui est, vous le savez, un de nos biens les plus chers. Ensuite nous sommes heureux que, grâce en grande partie à votre action, la France continue à demeurer le centre des développements du système métrique et à abriter le Bureau international des poids et mesures. Et j'oserai vous dire que je ne vous parle pas seulement aujourd'hui en tant que président de l'Académie des Sciences : permettez-moi de vous parler aussi en mon nom personnel. Le lien que vous représentez entre la Hollande et la France me touche, parce mon père était hollandais, s'est battu toute sa vie pour l'amitié entre nos deux pays, a fondé l'Association France-Hollande et a poussé l'amour de la France jusqu'à épouser une Française, me faire naître à Paris et me permettre ainsi d'être français. Les quelques gouttes de sang néerlandais que j'ai dans les veines accroissent le plaisir que je tire de la cérémonie d'aujourd'hui.

« Monsieur Jan de Boer, je vous connais peu. Mais vos amis m'ont beaucoup parlé de vous. Grâce à eux, et spécialement à Jean Kovalevsky, je sais que vous n'êtes pas seulement un homme de science, mais aussi un homme de haute qualité humaine, généreux, loyal, et, ce qui m'enchant plus encore, optimiste et confiant dans l'homme et son destin dans un temps où ce n'est plus de mode. Bref, vous êtes un de ces êtres dont la terre des hommes a aujourd'hui besoin. Autre indiscretion, je sais combien Madame de Boer vous aide et vous soutient, et qu'elle mérite une bonne partie de la décoration que j'ai la joie de vous remettre.

« Jan de Boer, au nom du président de la République, je vous fait chevalier de la Légion d'honneur. »

M. DE BOER répond en ces termes :

« Monsieur le président de l'Académie des Sciences,

« C'est un grand honneur à l'occasion de la 19<sup>e</sup> Conférence générale de recevoir la haute distinction que Monsieur le président de la République française a daigné me conférer. Je vous prie, Monsieur le président, de bien vouloir être, auprès du président de la République, l'interprète de ma profonde gratitude.

« Je suis tout particulièrement touché par cette marque de bienveillance qui honore mes activités dans le cadre du Bureau international des poids et mesures et de son Comité international.

« Bien évidemment, je suis très heureux de cette marque d'appréciation de la part de la République française, le pays où le Bureau international des poids et mesures a trouvé, à Sèvres, son domicile international, mais avant tout la nation qui a joué un rôle décisif dans le développement du Système métrique, l'ancêtre du Système international d'unités auquel notre Bureau international est entièrement consacré.

« Le territoire international que la France a mis à notre disposition dans le Parc de Saint-Cloud, il y a maintenant plus de cent ans, est actuellement, avec le Pavillon de Breteuil et les laboratoires de recherche qu'il abrite, le centre mondial de la métrologie scientifique de haut niveau nécessaire pour conserver le Système international d'unités.

« La France a toujours apporté sa coopération indispensable en approuvant la construction de nouveaux bâtiments et laboratoires dans ce Parc de Saint-Cloud, dont la beauté est imposante et qui constitue un monument historique pour la France.

« Je suis particulièrement honoré que la distinction qui m'est remise aujourd'hui me soit accordée par le pays qui, historiquement, fut à l'origine des principes du Système métrique dont le Système international d'unités est issu.

« La Révolution française a été commémorée encore récemment. On a rappelé le souvenir de ses savants : Condorcet, Lavoisier, Laplace, Monge, Delambre et Méchain et de beaucoup d'autres. Il faut aussi redire le rôle de sa célèbre Académie des Sciences qui, à l'époque, a poussé fortement la réforme des mesures avec l'introduction du Système métrique. Plus tard le Système métrique a été largement accepté par le monde scientifique : il suffit de mentionner Gauss, Weber et Maxwell qui ont contribué à développer les bases scientifiques pour un système métrique d'unités.

« Toutefois après l'Exposition universelle qui s'est tenue à Paris en 1867, c'est à nouveau ici, à Paris, qu'a débuté une série de conférences internationales, lesquelles ont abouti à la signature de la Convention du Mètre et à la création du Bureau international des poids et mesures, à Sèvres. Ce fut vraiment la première étape fondamentale du développement du Système international.

« J'ai eu le privilège de pouvoir suivre de très près l'évolution du Bureau international et le développement du Système international d'unités après la guerre. Ce fut une période mouvementée, embrassant de nouveaux domaines de la physique, pour arriver finalement à un système d'unités qui couvre tous les aspects fondamentaux de la physique et des techniques.

« Je considère que ce fut vraiment pour moi un privilège de travailler dans le cadre d'une communauté de scientifiques qui se consacraient au développement de la métrologie à son plus haut niveau, avec un but commun : améliorer le fonctionnement du Système international. J'ai connu là une satisfaction profondément humaine, celle de collaborer au développement d'un système scientifique d'une beauté intrinsèque.

« Pour terminer je veux exprimer ma satisfaction et ma joie de pouvoir assister à la propagation du Système international parmi les peuples du monde entier. Je rappellerai les mots de Condorcet : « À tous les hommes, à tous les temps ». On peut en effet constater que le Système international, grâce à sa simplicité, satisfait aux demandes croissantes de la technique et du commerce international. Les nouvelles générations grandissent avec ce merveilleux outil et cela est vraiment une grande satisfaction pour ceux qui s'efforcent toujours de travailler à l'amélioration de ce système. »

---

---

**TROISIÈME SÉANCE**  
**DE LA 19<sup>e</sup> CONFÉRENCE GÉNÉRALE**  
**DES POIDS ET MESURES**

tenue le mercredi 2 octobre 1991, à 15 heures

---

Le PRÉSIDENT ouvre la séance en disant que la visite des laboratoires et la réception qui se sont déroulées la veille sont des occasions importantes pour chacun d'avoir des contacts avec les physiciens qui travaillent au BIPM et de mieux cerner l'enjeu que représente le rôle du BIPM.

Il signale aussi que le Groupe de travail pour la dotation du BIPM pour les quatre années 1993-1996 a présenté son rapport. Ce document a été distribué aux délégués, ce qui leur permet d'en prendre connaissance et de réfléchir sur son contenu avant que la question ne soit discutée.

### **13. Rayonnements ionisants**

Puis il donne la parole à M. QUINN pour le rapport du Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants. En effet, M. Sala, président en titre du CCEMRI, a été empêché d'assister à la présente conférence pour des raisons de santé.

M. QUINN donne lecture du rapport suivant :

L'utilisation des rayonnements ionisants continue d'augmenter dans les domaines de la médecine, de la production d'énergie ainsi que dans de nombreuses applications techniques et scientifiques. Les besoins qui en découlent sont très variés : types de rayonnement, domaines d'énergie, etc. Il faut donc que l'on dispose d'étalons fiables aussi bien pour des irradiations très intenses que pour assurer la radioprotection. La complexité des phénomènes physiques impliqués dans les mesures de rayonnements ionisants entraîne une grande diversité sur le plan expérimental.

Pour les applications médicales et industrielles, l'exactitude des étalons de mesure de rayons X et  $\gamma$ , de neutrons et de radioactivité doit être de l'ordre de 1 %, précision qui est souvent difficile à atteindre. Le CCEMRI conseille le BIPM dans sa tâche qui consiste à assurer l'uniformité des mesures et à en augmenter l'exactitude. En pratique, ceci se fait de plusieurs manières, par exemple en organisant une comparaison

internationale pour un radionucléide ou, en dosimétrie, par la comparaison directe des instruments de mesure servant d'étalons nationaux avec l'étalon du BIPM, dans un faisceau de rayonnement bien défini. Le programme de travail est établi en collaboration avec le CCEMRI.

En 1989, le CIPM a décidé d'élargir la composition du CCEMRI, qui se limitait à son président et à ceux des trois sections, et d'y adjoindre quatre personnalités de réputation internationale dans le domaine des rayonnements ionisants. Ce nouveau comité s'est réuni le 24 mai 1991. Les trois sections du CCEMRI se sont réunies chacune deux fois depuis la 18<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures : la Section I (Rayons X et  $\gamma$ , électrons) du 11 au 13 avril 1988 et du 21 au 23 mai 1991, la Section II (Mesure des radionucléides) du 29 au 31 mai 1989 et du 21 au 23 mai 1991 et la Section III (Mesures neutroniques) du 18 au 20 avril 1988 et du 21 au 23 mai 1991. Les principaux résultats des travaux du CCEMRI, ainsi que les activités correspondantes du BIPM, sont présentés dans ce rapport par domaine d'activité des sections du CCEMRI.

#### *Rayons X et $\gamma$ , électrons*

De nombreux laboratoires ont demandé leur rattachement aux étalons de kerma dans l'air et de dose absorbée dans le graphite et dans l'eau, étalons établis et maintenus au BIPM. Ce rattachement permet aux laboratoires nationaux qui possèdent des étalons primaires de se comparer entre eux sur une période d'environ vingt ans. Neuf comparaisons ont été effectuées depuis 1987 impliquant sept pays. Dans le cas des laboratoires nationaux ayant comme référence nationale des étalons secondaires, ce rattachement est périodique. Ainsi trente-six chambres d'ionisation ont été étalonnées pour huit pays. D'autre part les références de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) sont aussi rattachées au BIPM. Cette organisation, qui gère un réseau de laboratoires secondaires comprenant quarante-neuf pays, a effectué deux contrôles des étalons de son laboratoire depuis 1987.

À la suite d'une recommandation de la Section I du CCEMRI, le BIPM a construit et mis au point un étalon fiable pour la mesure de l'équivalent de dose ambiant, nouvelle grandeur définie par l'ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements) pour le domaine de la protection contre les rayonnements.

Récemment, une étude théorique sur l'effet de perturbation concernant les étalons calorimétriques pour la mesure de la dose absorbée dans le graphite a permis de résoudre un problème épineux laissé jusqu'alors en suspens.

Par ailleurs, des études approfondies, tant expérimentales que théoriques, ont permis de mettre au point un étalon ionométrique pour la mesure de la dose absorbée dans l'eau, dont la stabilité est excellente et la précision de l'ordre de 0,3 %. Une autre méthode, indirecte mais simple, dite méthode du « scaling theorem », a également été utilisée pour la mesure de cette grandeur. Les résultats sont en bon accord avec ceux de la méthode précédente. Une comparaison effectuée entre le BIPM et deux laboratoires nationaux possédant des étalons calorimétriques a donné de bons résultats. Un programme de mesure calorimétrique vient d'être lancé : il permettra, outre un apport à la compréhension actuelle des différents problèmes inhérents à cette méthode, de s'orienter dans l'avenir vers la mesure des photons de haute énergie.

### *Mesure de radionucléides*

Les travaux faits au BIPM dans le domaine des mesures d'activité comportent deux parties : les comparaisons internationales, portant sur des mesures absolues, et le Système international de référence (SIR), fondé sur des mesures relatives. Ces deux manières de procéder se complètent.

Les radionucléides sélectionnés par la Section II ces dernières années sont parmi ceux qui présentent des difficultés expérimentales particulières. Une comparaison préliminaire de mesures d'activité de solutions de  $^{125}\text{I}$  entre sept laboratoires ayant donné de bons résultats, la Section II a décidé de procéder à une comparaison internationale de ce radionucléide. Les dix-neuf participants ont utilisé huit méthodes différentes. La dispersion des résultats, de 3,5 %, peut être considérée comme satisfaisante.

La comparaison préliminaire suivante concernait le  $^{75}\text{Se}$ . Ce radionucléide a un état métastable à 304 keV qui rend les mesures particulièrement difficiles. Les cinq participants ont réussi à atteindre une dispersion qui ne dépasse pas 2,5 %, ce qui est suffisant pour envisager l'organisation d'une comparaison à grande échelle.

Les résultats de toutes ces comparaisons ont été rassemblés et analysés au BIPM. Par ailleurs, le BIPM a effectué une mesure de la période de l'état isomère du  $^{75}\text{Se}$ . Grâce à des précautions particulières, la valeur obtenue est environ dix fois plus précise que les résultats obtenus auparavant.

Le Système international de référence (SIR), qui permet de comparer des activités d'émetteurs de rayons  $\gamma$ , continue à rendre des services appréciés par les participants. En quinze ans, plus de 550 ampoules, contenant 50 radionucléides différents, ont été mesurées. Ce succès a amené la Section II à demander l'extension du système existant à des émetteurs  $\beta$  et  $\alpha$ . Des études menées en collaboration avec le NIST ont conduit le BIPM à acquérir un système à scintillation liquide. On étudie actuellement les conditions optimales d'utilisation de ce système dans le cadre d'un SIR étendu.

Les études concernant les principes de la méthode des coïncidences et les statistiques de comptage ont été poursuivies avec succès, au BIPM ainsi que dans plusieurs laboratoires nationaux. Parmi les progrès réalisés, il convient de mentionner l'utilisation des temps morts généralisés, domaine qui a ouvert de nouvelles possibilités expérimentales dont certaines sont déjà exploitées. Une publication rassemble l'information jusqu'à présent dispersée dans de multiples rapports. Récemment, le BIPM a proposé une approche originale au vieux problème souvent considéré comme insoluble qui consiste à mesurer directement le taux de coïncidences vraies, sans passer par une correction pour les coïncidences fortuites. La méthode, qui se fonde sur la parité des comptages et n'implique aucun temps de résolution, a été implantée électroniquement et fonctionne comme prévu. Les résultats des recherches entreprises par les membres de ce groupe de travail de la Section II sont décrits dans dix-huit documents.

### *Mesures neutroniques*

Les principaux travaux effectués dans le domaine des mesures neutroniques comprennent d'abord l'organisation et l'analyse des résultats de la comparaison internationale de mesures de débit de kerma, avec circulation des instruments de transfert étudiés et sélectionnés par le BIPM. Un accord satisfaisant a été obtenu pour les valeurs de kerma neutronique mesurées dans les champs mixtes des laboratoires avec l'équipement du BIPM et celui des participants.

Par ailleurs, pour répondre à une demande de la Section III, le BIPM a étudié un scintillateur liquide, équipé d'un système de discrimination neutrons-gamma, dans les champs neutroniques de 2,5 et 14,65 MeV. L'analyse des spectres neutroniques se fera à l'aide de spectres théoriques obtenus par calcul de Monte Carlo.

Lors de sa dernière réunion, la Section III a discuté le problème des mesures de spectres neutroniques et a recommandé que le BIPM mette au point l'équipement nécessaire. De plus, elle a demandé au BIPM de maintenir les étalons de transfert et les capacités de mesure dans le domaine des mesures neutroniques.

Au cours de la réunion du CCEMRI élargi, certains problèmes particuliers soulevés par les sections ont été étudiés dans un contexte plus général et l'importance croissante des rayonnements ionisants et de leurs applications a été soulignée à nouveau. L'examen du programme de travail envisagé a donné lieu à des recommandations soumises au CIPM.

Ce rapport ne donne lieu à aucun commentaire ni aucune question.

#### **14. Le Système international d'unités (SI)**

La parole est à M. DE BOER, président du Comité consultatif des unités (CCU), pour la présentation de son rapport.

Le Système international d'unités constitue un système scientifique et logique, adapté aux besoins internationaux de la science et de la technique, et un moyen nécessaire au développement des relations économiques et commerciales entre les peuples du monde entier.

La période de quatre années depuis la dernière Conférence générale, période qui fait l'objet du présent rapport, a été marquée par quelques commémorations d'événements historiques qui sont d'une grande importance pour le SI. Les plus importants étaient liés à la Révolution française qui eut lieu il y a deux siècles et qui a été célébrée amplement en 1989. Le Comité international des poids et mesures a été invité à visiter l'exposition retraçant l'histoire du mètre, présentée au Musée national des techniques à Paris; il a assisté à une petite cérémonie au cours de laquelle fut mesurée par triangulation la longueur de l'ancien mètre en marbre, scellé dans la façade de l'Hôtel du ministère de la Justice, autrefois Chancellerie de France, place Vendôme, à Paris.

Il convient donc, à l'occasion de la présente Conférence générale des poids et mesures, de rappeler quelque peu les événements qui ont exercé une influence décisive dans le domaine des poids et mesures. Nous nous limiterons à évoquer un événement historique qui eut lieu non loin d'ici, il y a exactement deux cents ans.

Ce fut le 19 mars 1791 que la proposition de l'Académie des Sciences visant à adopter le quart du méridien terrestre comme base pour définir l'unité de longueur, le mètre, fut présentée à l'Assemblée nationale, par *Condorcet*, secrétaire perpétuel de l'Académie. Le 30 mai 1791, le roi Louis XVI sanctionna la fameuse « Loi relative au moyen d'établir une uniformité des poids et mesures ».

Il fallut encore environ huit ans avant que la mesure d'un arc de 9 degrés et demi du méridien, entre Dunkerque et Barcelone, effectuée par *Delambre* et *Méchain* pour déterminer la longueur du mètre et les mesures sur le kilogramme, commencées par *Lavoisier* et *Haüy* et continuées par *Lefèvre-Gineau*, soient sanctionnées par une Commission de savants français et européens et s'achèvent par le dépôt, en 1799, aux Archives de la République, des étalons du mètre et du kilogramme. Ce fut vraiment le commencement du Système métrique, lequel est à l'origine du Système international d'unités, accepté maintenant dans le monde entier.

Depuis ces événements historiques, il y a deux cents ans maintenant, de nombreux scientifiques ont travaillé pour développer, à partir de ces bases, le concept moderne d'un système universel d'unités. Il faut mentionner d'abord *Weber* et *Gauss* et leurs recherches sur les mesures 'absolues' des grandeurs électriques et magnétiques. Il faut rappeler les travaux de *Maxwell* et de *Thomson*, dans le cadre de la British Association for the Advancement of Science. Cela a conduit, pour la physique, au développement d'un système tri-dimensionnel fondé sur les trois grandeurs de base : longueur, masse et temps, et en 1873 à l'introduction du système CGS cohérent, fondé sur le centimètre, le gramme et la seconde, pour exprimer d'une façon cohérente non seulement les mesures mécaniques mais aussi les mesures électriques et magnétiques.

Après la signature de la Convention du Mètre le 20 mai 1875 et la création du Bureau international des poids et mesures, il y a maintenant un peu plus de cent ans, la première Conférence générale des poids et mesures, en 1889, remplaça le mètre et le kilogramme dits 'des Archives' par de nouveaux 'prototypes internationaux' déposés dans un caveau au Bureau international, à Sèvres. La constitution de ce laboratoire international et le dépôt des prototypes internationaux qui lui furent confiés, marquèrent vraiment la naissance de la métrologie de haute précision, nécessaire pour maintenir un tel système d'unités sur le plan international.

Ces prototypes internationaux du mètre et du kilogramme devaient vraiment servir de base métrologique pour toutes les mesures de la physique, mais les unités électriques et magnétiques soulevaient encore des problèmes. Le Congrès international d'électricité avait sanctionné depuis 1881 l'usage d'un ensemble d'unités 'pratiques', l'ampère, l'ohm, le volt, etc. Ces unités pratiques n'étaient pas cohérentes avec le système CGS : elles se déduisaient des unités cohérentes du système CGS en multipliant celles-ci par des puissances de dix 'convenables'. En 1921, pour résoudre ces problèmes, la sixième Conférence générale étendit explicitement la compétence de la Convention du Mètre, entre autres, aux unités électriques. Par la suite, le Comité international créa un Comité consultatif d'électricité pour s'occuper spécialement des unités électriques. Cela permit finalement de trouver au niveau international une solution pour la cohérence systématique de l'ensemble des unités mécaniques et électromagnétiques.

Du point de vue de la physique théorique aussi la description des phénomènes électromagnétiques demandait une révision du système tri-dimensionnel développé par Maxwell et la British Association pour décrire les phénomènes de la physique. Dans les vingt dernières années du XIX<sup>e</sup> siècle *Heaviside* et *Giorgi* ont ouvert la voie qui permit d'inclure en physique d'une façon naturelle les phénomènes électromagnétiques. Ils ont montré que pour cela il est nécessaire de disposer d'un système comportant quatre grandeurs de base. *Giorgi*, en particulier, a montré dès 1901 que le choix du mètre, du kilogramme et de la seconde comme unités de base mécaniques et, par exemple, de l'ohm ou de l'ampère comme unité de base électrique fournirait un

système quadri-dimensionnel d'unités qui permettrait d'inclure l'ensemble des unités pratiques adoptées par les électriciens en 1881 et confirmées en 1893 par le Congrès de Chicago.

Les contributions importantes de Giorgi au développement du système d'unités ont fait l'objet d'une conférence internationale commémorative qui s'est tenue à l'Istituto Politecnico, à Turin, les 21 et 22 septembre 1988. Cette conférence, à laquelle participaient un grand nombre de scientifiques, a vraiment mis en relief l'importance historique et métrologique des recherches de Giovanni Giorgi et l'influence qu'il a exercée sur le développement ultérieur du Système international d'unités.

Il n'est pas nécessaire de poursuivre ici l'histoire bien connue du Système international d'unités. Les développements furent interrompus par la guerre et c'est en 1960 que le Système international d'unités, fondé initialement sur six unités de base, le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, le kelvin et la candela, fut adopté par la onzième Conférence générale des poids et mesures. La septième unité de base, la mole, fut ajoutée par la quatorzième Conférence générale.

La conservation du Système international est une des tâches les plus importantes du Comité international et de son Comité consultatif des unités. Cette année est parue la sixième édition de la brochure « Le Système International d'Unités (SI) », bilingue comme la précédente édition. Il y est rassemblé dans un ordre systématique l'ensemble des Résolutions et des Recommandations de la Conférence générale et du Comité international relatives au Système international d'unités. Sont ajoutés des commentaires explicatifs et des règles d'application adoptées par l'Organisation internationale de normalisation (ISO).

Le CCU a tenu sa dixième session à Sèvres, en 1990, réunion au cours de laquelle le texte de cette brochure a été discuté. Les modifications les plus importantes concernaient l'Annexe II, « Mise en pratique des définitions des principales unités », pour tenir compte des décisions prises par le CIPM en 1988 et 1989, décisions relatives à la mise en pratique des unités électriques et à l'entrée en vigueur de l'Échelle internationale de température de 1990. Dans cette même annexe, les textes concernant la masse et le temps ont aussi été améliorés.

De plus, répondant à une demande de l'Union internationale de chimie pure et appliquée, le CCU a reconnu la nécessité d'introduire de nouveaux préfixes pour plusieurs puissances de dix :  $10^{21}$ ,  $10^{24}$ ,  $10^{-21}$  et  $10^{-24}$ . En préparant sa proposition, le CCU a cherché à respecter les règles suivantes : a) les préfixes se terminent par 'o' pour les puissances négatives et par 'a' pour les puissances positives ; b) les symboles des préfixes sont en capitales pour les puissances positives et en minuscules pour les puissances négatives.

Le CIPM propose à la Conférence générale d'adopter les préfixes et symboles qui figurent dans le projet de résolution D. Les préfixes 'zepto' et 'zetta' évoquent le nombre sept, en latin 'septem' (la septième puissance de  $10^{-3}$  et  $10^3$ ), mais la lettre 'z' a été substituée à la lettre 's' afin d'éviter le symbole 's' comme préfixe. Les préfixes 'yocto' et 'yotta' évoquent le nombre huit, en latin 'octo', (la huitième puissance de  $10^{-3}$  et  $10^3$ ), mais la lettre 'y' a été ajoutée afin d'éviter le symbole 'o' comme préfixe.

M. DE BOER donne lecture du projet de résolution D relatif aux préfixes zetta, zepto, yotta et yocto.

M. J. THOR demande à intervenir non en tant que représentant de la Suède mais comme secrétaire de l'ISO/TC 12 : « Dans le rapport du CCU, M. de Boer a indiqué que les règles d'application du SI sont adoptées par l'ISO. L'ensemble complet des règles fait l'objet de la norme internationale ISO 31. Dans les différentes sections de la norme ISO 31, le système des grandeurs, sur lequel est fondé le SI, est également exposé. L'édition actuelle de la norme ISO 31 date maintenant d'une dizaine d'années. Elle a fait l'objet d'une révision par l'ISO. Au cours de l'année écoulée toutes les sections de la norme ISO 31 qui ont été révisées ont été approuvées par les membres de l'ISO et la nouvelle édition sera prochainement disponible. Monsieur le président, permettez-moi, en ma qualité de secrétaire de l'ISO/TC 12, de saisir cette occasion pour remercier deux membres du CIPM pour leur importante contribution à la révision de la norme ISO 31. Ce sont Jan de Boer, président du CCU, et Henning Højgaard Jensen, président de l'ISO/TC 12. Pour terminer je voudrais remercier Terry Quinn, directeur du BIPM et ses collaborateurs pour l'hospitalité qu'ils nous ont accordée au BIPM pendant nos travaux. Merci beaucoup. »

M. de Boer remercie M. Thor et demande que la déclaration de celui-ci soit consignée dans les comptes rendus de la Conférence.

### **18. Renouvellement par moitié du Comité international**

Ainsi qu'il en a été convenu une modification dans l'ordre de discussion des différents points de l'ordre du jour est apportée et le président demande à M. Kovalevsky, secrétaire du CIPM et secrétaire de la Conférence, d'aborder le renouvellement par moitié du CIPM et d'en expliquer la modalité.

M. KOVALEVSKY rappelle qu'à la suite de quatre démissions intervenues depuis la précédente Conférence générale, le CIPM a été amené à coopter MM. Clapham, Joshi, Lyons et Poustovoit. L'élection de ces quatre personnalités est soumise à la ratification de la Conférence générale. De plus, pour porter à neuf le nombre des membres à élire ou à ré-élire, il a été procédé à un tirage au sort de cinq noms lors de la session du CIPM qui vient de se dérouler les 26 et 27 septembre 1991. Ce tirage au sort a désigné MM. Blevin, de Boer, Preston-Thomas, Skákala et Wang Daheng. Cela porte à neuf le nombre des membres proposés au suffrage de la Conférence générale.

Il est donc procédé au vote à scrutin secret par pays, chaque chef de délégation déposant son bulletin dans l'urne. Le dépouillement est confié à trois scrutateurs : MM. Blouet (France), Birkeland (Norvège) et Quinn (BIPM). Après une interruption d'environ cinq minutes le résultat du vote est proclamé. Trente-huit votes ont été exprimés.

MM. W. R. BLEVIN .....	38
J. DE BOER .....	37
P. B. CLAPHAM .....	38
S. K. JOSHI .....	38
J. W. LYONS .....	38
V. I. POUSTOVOIT .....	36
H. PRESTON-THOMAS ..	38
J. SKÁKALA .....	35
WANG Daheng .....	38

Tous les membres sortants, rééligibles, proposés par le Comité international, sont élus ou réélus. Aucun nouveau nom n'a été proposé. (*Applaudissements*).

### 15. Programme des travaux futurs du BIPM

Le PRÉSIDENT donne la parole à M. QUINN (BIPM) pour la présentation du programme de travail du BIPM proposé pour les quatre années 1993-1996.

M. QUINN souligne tout d'abord une fois de plus que le BIPM est un laboratoire scientifique mais que c'est un petit laboratoire dont le personnel scientifique n'est que d'environ 25 personnes. Ce personnel scientifique est réparti en six sections, correspondant aux six domaines d'activité. On peut considérer que pour chaque section les activités se répartissent en trois catégories : 1) les comparaisons internationales ; 2) les étalonnages et 3) la recherche. Le but de celle-ci est de sous-tendre et d'aider les deux premières catégories d'activités et de maintenir le niveau des connaissances des physiciens.

Pour ce qui est des comparaisons internationales, dans le domaine des *longueurs* par exemple, le BIPM effectue des comparaisons de longueur d'onde de lasers asservis, en particulier de lasers équipés de cellules à iode. Dans le domaine des *masses*, le BIPM a la charge de disséminer l'unité de masse. À cet effet il effectue des vérifications comme celle qui se déroule actuellement. Dans le domaine du *temps*, c'est grâce à des comparaisons d'horloges, bien que celles-ci ne soient pas faites au BIPM, que l'on peut établir le TAI ainsi que l'UTC et les disséminer. En *électricité*, les choses ont beaucoup évolué. Dans le passé des piles étalons étaient apportées au BIPM et faisaient l'objet de comparaisons à grande échelle. Aujourd'hui les méthodes ont beaucoup changé depuis l'introduction des réseaux de jonctions de Josephson par exemple et il n'est plus nécessaire de procéder à de grandes comparaisons périodiques, car la plupart des laboratoires nationaux sont en mesure de conserver leurs propres étalons avec une bonne stabilité à long terme. Toutefois, si le type de travail n'est plus le même, le travail de vérification n'a en rien diminué. En effet, il ne faut pas seulement s'assurer que, pour les constantes sur lesquelles la réalisation des unités est maintenant fondée, la valeur admise est bien obtenue mais il faut aussi contrôler toute l'électronique nécessaire à cette réalisation.

Il en est un peu de même en ce qui concerne la *photométrie* et la *radiométrie*. L'accent est moins mis sur la photométrie que par le passé et le BIPM doit développer ses capacités en vue d'effectuer des comparaisons de récepteurs.

Dans le domaine des *rayonnements ionisants*, il faut continuer à assurer des comparaisons en dosimétrie des rayons X. Par ailleurs, le BIPM a entrepris d'étendre le Système international de référence pour les mesures d'activité d'émetteurs de rayonnement  $\gamma$  (SIR) et cet effort doit se poursuivre.

Pour ce qui est des étalonnages, la situation diffère d'un domaine à l'autre. Pour les *longueurs*, les étalonnages concernent aussi bien des règles à traits de 1 m que des cales étalons. Pour les *masses*, le rôle principal du BIPM est de vérifier les prototypes du kilogramme en platine iridié. Toutefois, on étalonne aussi des masses de 1 kg en acier inoxydable. Dans le domaine du *temps*, bien qu'il n'existe pas de service d'étalonnage en tant que tel, il faut mentionner les étalonnages de récepteurs du Global Positioning System (GPS) qui sont effectués de temps à autre par le personnel du BIPM dans un certain nombre de laboratoires. En *électricité*, malgré les changements intervenus, le BIPM est encore sollicité pour des étalonnages de piles étalons et de résistances de 1  $\Omega$ . En *radiométrie*, le BIPM n'assure pour le moment aucun étalonnage mais il fait encore des étalonnages de lampes photométriques. Enfin dans le domaine des *rayonnements ionisants* il est couramment procédé à des étalonnages de chambres d'ionisation par exemple.

M. QUINN aborde enfin le troisième type d'activités, celui qui concerne la recherche et le développement. Dans le domaine des *longueurs*, pour bien maîtriser et améliorer le travail fait avec les lasers il est important de mieux comprendre les processus physiques qui interviennent dans un laser dont la fréquence est asservie par absorption saturée sur des molécules d'iode, de méthane ou de dioxyde de carbone. En ce qui concerne les *masses*, il est important de faire des études sur les effets de surface des prototypes en platine iridié. Il est par exemple nécessaire d'aborder la physico-chimie des surfaces. Par ailleurs, toujours dans ce domaine, le BIPM a besoin de balances. Les études sur les balances sont donc souhaitables. Il convient aussi de suivre les variations à court terme que présentent les étalons de masse. Dans le domaine du *temps*, il est fondamental de travailler sur les algorithmes qui permettent de calculer le TAI. Par ailleurs, au fur et à mesure de l'accroissement d'exactitude des échelles de temps, on se trouve confronté aux problèmes posés par les effets de la relativité ; il devient nécessaire alors d'en avoir une meilleure compréhension. En *électricité*, il convient d'étudier de nouvelles méthodes d'utiliser l'effet Josephson et l'effet Hall quantique. Il faut aussi inspecter les possibilités d'utiliser des étalons de transfert. La meilleure connaissance des propriétés des supraconducteurs peut avoir des répercussions sur la métrologie ; il faut les explorer. En *radiométrie*, il convient de développer l'étude des cellules photoélectriques pour les comparaisons. Par ailleurs il faut prévoir l'utilisation de la radiométrie cryogénique et l'intérêt que peut présenter un radiomètre cryogénique transportable. Dans le domaine des *rayonnements ionisants*, il faut suivre le développement de la calorimétrie et poursuivre

l'extension du SIR, sans laisser de côté le programme à long terme des statistiques de comptage. Bien que dans les dernières années il ait été décidé d'abandonner tout travail nouveau en *thermométrie*, il n'en reste pas moins que le BIPM doit être capable d'assurer les mesures dont ses laboratoires ont besoin dans le domaine voisin de la température ambiante et les mesures de pression au voisinage de la pression atmosphérique. Par ailleurs, il est nécessaire d'avoir un atelier capable de répondre aux besoins spécifiques de certaines installations et de certains montages. Cet atelier doit se moderniser et être équipé en machines numériques. Finalement toutes les sections font appel aux ordinateurs à différents stades y compris l'automatisation des mesures : il convient en conséquence de moderniser constamment les équipements et les logiciels. Dernier souci pour les laboratoires, ce sont les conditions de stabilité de la température et de l'humidité. Pour cela le BIPM a un programme à long terme d'amélioration du conditionnement d'air des laboratoires. Par ailleurs, il convient de rappeler qu'il est fondamental pour les physiciens de disposer d'une bibliothèque digne de ce nom avec toute la documentation et l'information dont ils peuvent avoir besoin. Dernière étape à mentionner c'est celle des publications. Le BIPM doit publier les résultats de ses travaux. Un gros effort dans ce sens a été fait au cours des années récentes.

Pour terminer son exposé, M. QUINN souligne que, en tout ce qu'il vient de passer en revue, et bien que le BIPM soit un petit laboratoire, le travail fait doit être au même niveau que ce qui est réalisé dans les grands laboratoires nationaux. Lorsqu'on se trouve devant un choix à opérer entre deux Conférences générales, ce choix incombe au CIPM. Il est essentiel que le personnel scientifique du BIPM ait un haut niveau de qualification et soit motivé. Il doit certes disposer des équipements nécessaires pour accomplir sa tâche mais il doit aussi avoir le sentiment d'être appuyé par ceux qui le paient, c'est-à-dire les Pays membres de la Convention du Mètre. Pour cela il doit se sentir soutenu par la Conférence générale et par le CIPM. Il a l'impression que cela est effectivement le cas.

M. MARÉCHAL remercie M. Quinn pour la clarté de son exposé, la conviction et l'enthousiasme qu'il a su faire passer. Il sollicite les commentaires éventuels des participants.

M. VANIER (Canada) félicite le directeur pour la présentation de son programme. Il rappelle en particulier les trois catégories de travaux mentionnées par M. Quinn. Pour lui ces directions s'intègrent à la mission du BIPM. Cependant M. VANIER aimerait voir clarifier la mission exacte du Bureau. Par ailleurs, il apprécierait d'avoir des indications sur la répartition qui existe entre les trois catégories d'activités indiquées. À son avis, cette précision serait intéressante pour tous les participants.

M. QUINN estime que les réponses se trouvent dans le rapport du président du CIPM. Pour ce qui est du rôle du BIPM, il a été défini dans la Convention du Mètre. Il est vrai que ce traité a été rédigé en 1875. Beaucoup de choses ont changé. Il s'ensuit que le rôle du BIPM a évolué depuis lors. À sa session de 1984 (*BIPM Proc.-verb. du Com. int. poids et mesures, 1984, 52, p. 7*), le

CIPM a discuté du rôle du BIPM dans les années 80 et ses conclusions ont été exposées dans la Convocation à la 18<sup>e</sup> Conférence générale (*BIPM Comptes rendus 18<sup>e</sup> Conf. gén. poids et mesures*, 1987, p. 23), dans les termes suivants :

« L'objectif du BIPM est de fournir les bases physiques nécessaires pour assurer l'uniformité des mesures dans le monde. En conséquence, ses missions principales sont les suivantes :

- conserver et disséminer l'unité de masse ;
- établir et disséminer le Temps atomique international et, en collaboration avec les organismes astronomiques appropriés, le Temps universel coordonné ;
- constituer un centre pour les comparaisons internationales des réalisations d'autres unités, unités de base ou unités dérivées, et pour la dissémination ultérieure de ces unités, suivant les besoins de l'ensemble des laboratoires nationaux de métrologie : cela exige, entre autres, que dans divers domaines le BIPM conserve ses propres réalisations de certaines unités de base ou dérivées ;
- déterminer, éventuellement, la valeur de certaines constantes physiques étroitement liées à la définition, la réalisation ou la dissémination d'unités de base ou dérivées ;
- assurer le secrétariat scientifique et administratif de la Conférence générale des poids et mesures, du Comité international des poids et mesures et de ses comités consultatifs ;
- lorsque certaines comparaisons internationales patronnées par les comités consultatifs ne peuvent pas être prises en charge par le BIPM, fournir toute l'aide possible pour l'organisation de ces comparaisons ;
- s'assurer que les résultats de chaque comparaison internationale font l'objet d'un rapport circonstancié et que ces résultats, s'ils ne font pas l'objet d'une autre publication, sont publiés directement par le BIPM.

Pour assumer ces tâches avec l'efficacité et la qualité requises, le BIPM doit disposer d'un personnel scientifique, technique et administratif hautement qualifié et de moyens appropriés : laboratoires, équipement, bibliothèque, ateliers et autres installations, qu'il faut maintenir en permanence adaptés aux besoins modernes. »

M. VANIER répète qu'il souhaiterait voir redéfinir la mission propre du Bureau dont il a été question. Il se demande s'il serait possible d'évaluer par exemple la proportion des travaux consacrés à chacune des trois directions. Il aimerait avoir l'avis des autres délégations quant à leur intérêt sur ce sujet.

M. QUINN dit qu'il est difficile de donner une réponse générale. Dans certains domaines, dans le passé, le BIPM a consacré un effort particulièrement important aux comparaisons internationales alors que, dans le même temps et dans d'autres domaines, l'évolution rapide de la physique l'avait conduit à intensifier ses efforts de recherche sur les applications de cette évolution à la métrologie. Il lui faut maintenir une certaine souplesse et ajuster les proportions entre les différents types d'activité pour faire face aux besoins exprimés par les laboratoires nationaux. Si l'on veut répondre convenablement aux demandes des laboratoires, il est plus réaliste de garder cette souplesse.

M. VANIER se déclare satisfait d'entendre ce mot-clé de souplesse. Il lui paraît fondamental en effet que le BIPM demeure au service des Pays membres de la Convention du Mètre.

M. QUINN rappelle que l'objectif est de fournir aux États membres les bases de leur métrologie nationale.

Le PRÉSIDENT conclut la discussion en disant que le programme proposé lui paraît bien adapté à cet objectif.

M. BLEVIN (Australie) tient à ajouter un commentaire à propos de la présentation des travaux futurs faite par M. Quinn. À son avis, une façon utile d'apprécier la qualité des travaux du BIPM est pour un laboratoire de se rappeler les occasions qu'il a de s'adresser à lui. En tant que directeur d'un laboratoire national, M. Blevin s'adresse au BIPM chaque fois que celui-ci est mieux placé. Il considère que le BIPM est le meilleur endroit où l'on puisse obtenir des conseils. Il est bien qu'il en soit ainsi. Il faut donc que des recherches modernes y soient poursuivies mais il faut aussi qu'y soient conservés le savoir-faire et les connaissances hérités du passé. Parlant en tant que président du CCPR, M. Blevin rappelle que le BIPM était quelque peu dépassé par l'évolution récente dans ce domaine. Il se plaît à constater que la situation a été largement redressée et que le BIPM a maintenant atteint un bon niveau, qu'il ne se contente pas de suivre mais envisage l'avenir de façon dynamique. M. Blevin précise qu'il est heureux d'apporter son témoignage sur ce point.

M. MARÉCHAL remercie M. Blevin de ce dernier commentaire. Aucun autre délégué ne demandant à s'exprimer sur le programme des travaux futurs du BIPM, le Président passe au point suivant de l'ordre du jour.

## **16. Dotation annuelle du BIPM**

La parole est donnée à M. PRESTON-THOMAS pour la présentation du rapport du Groupe de travail pour la dotation du BIPM pour les quatre années 1993-1996.

M. PRESTON-THOMAS donne lecture du rapport.

« Ce groupe de travail était composé des délégations des pays suivants : Allemagne, Amérique (États-Unis d'), Canada, Chine (Rép. pop. de), Danemark, Espagne, France, Japon, Mexique, Royaume-Uni, Tchécoslovaquie et URSS.

Le président a demandé à toutes les délégations membres du groupe de travail d'exprimer leur opinion sur la proposition du CIPM relative à la dotation qui doit être votée par la 19<sup>e</sup> Conférence générale.

Le groupe de travail a remarqué que les informations d'après lesquelles le chiffre de 5 % par an pour l'augmentation annuelle à prévoir pour les prix en France étaient caduques. Les données plus récentes fondées sur l'indice officiel établi pour les organisations internationales en France suggèrent qu'un taux de 4 % serait plus probable. Tous les membres du groupe de travail ont accepté ce taux.

Une longue discussion a eu lieu ensuite, au cours de laquelle des points de vue différents ont été exprimés sur la proposition faite par le CIPM que l'extension récente et imprévue de la charge de travail de la section du temps nécessitait une augmentation de 625 000 francs-or de la base de départ pour le calcul de la dotation. Alors que certaines délégations ont soutenu cette proposition, la majorité a estimé que les fonds nécessaires pour les travaux relatifs au temps devraient être trouvés sans recourir à une telle augmentation abrupte.

Il a été convenu qu'une augmentation de la dotation est nécessaire pour tenir compte du surcoût dû à la complexité accrue des équipements, à la modernisation des bâtiments et à l'accroissement de la qualification du personnel. Bien qu'un taux de 3 % serait souhaitable, la conclusion générale a été qu'une valeur comprise entre 2 % et 3 % serait à la fois nécessaire et possible.

Pendant la discussion, des délégations ont exprimé leur satisfaction pour la qualité des travaux poursuivis au BIPM. En particulier, un fort soutien a été exprimé pour les travaux menés par la section du temps.

Le groupe de travail a pris note du fait que la base de départ utilisée par le CIPM pour le calcul de la dotation avait été diminuée de 1,26 % par suite de la disparition de la Rép. dém. allemande et l'adhésion de la Nouvelle-Zélande.

En tenant compte de ces considérations et aussi des restrictions budgétaires auxquelles se heurtent certains pays, le groupe de travail estime que la dotation devrait être fondée sur un taux de 4 % pour l'inflation et de 2 % pour la modernisation. Cela donne un total de 6 %, soit les nombres suivants :

1993	21 761 000 francs-or
1994	23 067 000 francs-or
1995	24 451 000 francs-or
1996	25 918 000 francs-or. »

La lecture du rapport étant terminée, le PRÉSIDENT remercie le groupe de travail pour ce premier résultat atteint. Il souligne l'importance que présentent les questions financières. Il lui paraît sain que celles-ci soient discutées franchement. Il sollicite donc les premières réactions « à chaud » des participants à la Conférence.

M. KOVALEVSKY précise que c'est à la prochaine séance, qui doit avoir lieu le lendemain, jeudi 3 octobre 1991, que la Conférence devra passer au vote de cette proposition faite par le Groupe de travail *ad hoc*. Il se joint au président pour dire qu'il aimerait lui aussi connaître les réactions « à chaud » des différentes délégations, ce qui lui permettrait, en tant que secrétaire de la Conférence, de réfléchir à la façon dont la discussion pourrait être menée avant le vote final.

M. MARÉCHAL rappelle une fois encore qu'il lui paraît sain que chacun s'exprime, en particulier s'il a des objections de principe ou des difficultés particulières.

Aucun délégué ne demandant la parole, M. KOVALEVSKY suggère de procéder à un vote blanc, c'est-à-dire de demander à chaque délégation de se prononcer

sans que cela soit considéré comme un vote définitif. Il souligne que les montants des dotations proposés par le Groupe de travail *ad hoc* sont inférieurs aux chiffres avancés par le CIPM pour les années considérées.

Avant de procéder à un vote blanc, le Président s'assure qu'aucune délégation ne s'oppose à cette façon de faire. Aucune objection n'étant manifestée, il est procédé à un appel par pays. Le vote blanc fait apparaître quatre abstentions.

La séance est levée à 16 h 55.

\*  
\* \*

À 18 h 30, les délégués et leurs épouses ont été invités par le Danish National Agency of Industry and Trade et le Danish Institute of Fundamental Metrology à une réception qui s'est déroulée dans les appartements de Monsieur l'Ambassadeur du Danemark, avenue Marceau, Paris (16<sup>e</sup>).

---

---

QUATRIÈME SÉANCE  
DE LA 19<sup>e</sup> CONFÉRENCE GÉNÉRALE  
DES POIDS ET MESURES

tenue le jeudi 3 octobre 1991, à 15 h 10

---

**9. 10. 11. 14.** Le PRÉSIDENT ouvre la séance en accueillant les délégués et en leur rappelant que l'ordre du jour comporte le vote des résolutions d'ordre scientifique dont les projets ont été présentés par les présidents des Comités consultatifs concernés en même temps que leurs rapports, ainsi que le vote de la dotation du Bureau international pour les quatre années 1993-1996.

M. MARÉCHAL demande si depuis la dernière séance une délégation a quelque remarque à faire ou une question à poser à propos de la dotation annuelle. M. VANIER (Canada) souhaite s'exprimer mais demande s'il doit le faire tout de suite ou au moment du vote final pour justifier son vote. M. MARÉCHAL estime qu'il serait préférable que M. Vanier fasse maintenant toute remarque qu'il estime devoir faire.

M. VANIER précise que ce qu'il a à dire fait suite à ce qu'il a déjà exprimé lors de la précédente séance la veille.

Le PRÉSIDENT demande si, à la suite du vote blanc qui s'est déroulé la veille, l'une ou l'autre des délégations qui se sont abstenues souhaite changer son vote et exprimer un vote négatif à la présente séance.

M. BRAY (Italie) présente les excuses du chef de la délégation d'Italie qui se trouve retardé. Il souhaite en conséquence que la Conférence diffère un peu le vote de la dotation et commence par procéder au vote des résolutions d'ordre scientifique.

M. KOVALEVSKY passe donc au vote par pays des projets de résolution d'ordre scientifique. Lecture est faite du projet de résolution A concernant les étalons de temps et les comparaisons de temps. La Résolution 1 est adoptée par 36 voix et 1 abstention.

M. VANIER fait remarquer que le Canada a, dans le passé, apporté une large contribution à l'élaboration des échelles de temps. Si les fonds nécessaires sont accordés à son laboratoire par son Gouvernement, il a l'intention de porter encore un effort particulier dans ce domaine.

M. KOVALEVSKY donne lecture du projet de résolution B sur l'effet Josephson et l'effet Hall quantique. La Résolution 2 est adoptée par 37 voix et 1 abstention.

Il est ensuite donné lecture du projet de résolution C sur l'Échelle internationale de température de 1990 et les travaux futurs en thermométrie. La Résolution 3 est adoptée par 37 voix et 1 abstention.

Après lecture du projet de résolution D sur les préfixes SI zetta, zepto, yotta et yocto, la Résolution 4 est adoptée par 37 voix et 1 abstention.

Toutes les résolutions d'ordre scientifique ayant été adoptées et le chef de la délégation italienne étant arrivé entre-temps, le PRÉSIDENT revient à la question de la dotation annuelle du BIPM.

M. VANIER (Canada) souhaite, ainsi qu'il en a déjà manifesté l'intention, faire des commentaires pour expliquer le vote de son pays.

« La délégation canadienne félicite le personnel du BIPM pour son excellent travail depuis la dernière Conférence générale. Nous désirons aussi féliciter le directeur du BIPM qui a dirigé le Bureau avec compétence et savoir-faire et nous désirons lui exprimer notre haute appréciation pour le dynamisme qu'il a su créer autour de lui, dynamisme dont les activités de son personnel apportent la preuve. En cette période où d'importants changements sont survenus dans la réalisation d'étalons pour la mise en œuvre des unités SI, spécialement dans le domaine des étalons de longueur et des étalons électriques, le personnel du Bureau a entièrement répondu aux besoins de la communauté internationale.

« Nous sommes d'accord avec la communauté internationale en ce qui concerne l'importance de la science de la mesure dans le monde industrialisé moderne. Dans ce contexte, le BIPM joue un rôle essentiel afin d'unifier les mesures physiques sur une base mondiale et, de cette façon, servir les pays signataires de la Convention du Mètre.

« Cependant, plusieurs pays participants, y compris le Canada, ont vu s'opérer des changements dans leurs programmes scientifiques et techniques, dus en partie aux récentes difficultés financières au niveau national. Ces difficultés ont aussi été ressenties par les institutions nationales qui ont subi des restrictions sévères dans la croissance de leurs propres activités et de leurs budgets. Dans certains cas, ces institutions sont étroitement associées au BIPM et fournissent directement la part nationale de la dotation du BIPM.

« Pour la dotation proposée par le CIPM, celui-ci demande une augmentation de 6 % par an pour les quatre prochaines années. Tout en étant pleinement conscients que ces fonds supplémentaires seraient utilisés pour des projets de grande valeur qui justifieraient cette augmentation, celle-ci n'est pas compatible avec les restrictions devant lesquelles nous nous trouvons. Par conséquent, même si nous appuyons entièrement le BIPM et la gestion de son directeur, nous pensons que nous devons nous abstenir lors du vote sur le montant proposé pour la dotation. »

M. KOVALEVSKY résume la situation en disant qu'il s'agit maintenant de mettre au vote le rapport du Groupe de travail *ad hoc* dont l'ensemble de la Conférence a pris connaissance à la séance du mercredi 2 octobre et à propos duquel elle a eu tout loisir de discuter et de réfléchir. Le vote porte sur l'approbation de ce rapport mais cela revient à accepter l'accroissement de la dotation du BIPM telle qu'elle ressort des chiffres qui y figurent. Il rappelle que cette augmentation est fondée sur un taux de 4 % pour l'inflation et de 2 % pour la modernisation, soit un total de 6 %. Il précise qu'il s'agit maintenant d'un vote définitif et il procède à l'appel par pays. Le résultat du vote est le suivant :

nombre de votes :	38
oui :	34
abstentions :	4 (Argentine, Canada, Inde, Indonésie).

L'augmentation proposée de 6 % est adoptée. En conséquence la partie fixe de la dotation annuelle du Bureau international des poids et mesures sera augmentée de telle façon que l'ensemble de la partie fixe et de la partie complémentaire (définie à l'Article 6 (1921) du Règlement annexé à la Convention du Mètre de 1875) est, pour les États parties à la Convention à l'époque de la 19<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures, porté à :

1993	21 761 000 francs-or
1994	23 067 000 francs-or
1995	24 451 000 francs-or
1996	25 918 000 francs-or.

## 17. Propositions de MM. les délégués

Le PRÉSIDENT indique que le Comité international n'a reçu aucune proposition pour soumission à la Conférence générale.

## 19. Questions diverses

M. DRĂGULĂNESCU, chef de la délégation de la Roumanie, propose que soit mis sur pied dans le cadre des activités du BIPM, un groupe de travail chargé de répondre aux besoins des pays en voie de développement. Ces besoins sont de deux ordres. Ces pays ont besoin d'être aidés sur un plan purement métrologique mais ils ont aussi et surtout besoin d'informations. Il est souhaité que la participation du BIPM à cet égard soit plus grande, dans l'intérêt même de tous les pays du monde car il y a beaucoup à faire. Le groupe de travail proposé devrait faire des recommandations concernant l'organisation d'un laboratoire national de métrologie, avec plusieurs approches possibles. Ces recommandations devraient porter, par exemple, sur les équipements de base et la dotation minimale nécessaires au fonctionnement de ce type de laboratoire. Ce groupe de travail devrait aussi publier des bibliographies spécialisées sur les méthodes et procédures pratiques à suivre pour conserver et disséminer les unités de mesure.

M. KIND, président du CIPM, répond qu'il est difficile de donner une réponse immédiate à cette suggestion. En effet, celle-ci n'est pas dans la ligne directe de la mission du BIPM. Il est quasiment impossible d'assurer le niveau le plus élevé d'exactitude des étalonnages et dans le même temps assurer des services sur une grande échelle. Les deux perspectives sont incompatibles. Toutefois, le CIPM réfléchira au problème et portera ce sujet à l'ordre du jour de sa prochaine session. Il fera part de cette réflexion à la délégation de la Roumanie.

M. QUINN dit que sa première réaction va dans le même sens. Il a effectivement le sentiment que le BIPM devrait avoir plus d'action en faveur des pays en voie de développement. C'est un peu en ayant cette préoccupation à l'esprit qu'il tente de diffuser au maximum certaines connaissances ou un certain savoir-faire. Prenant l'exemple des mesures de température, il rappelle que le Comité consultatif de thermométrie a préparé et édité un document sur la réalisation secondaire de l'EIT-90. C'est tout à fait le genre d'informations qui peuvent être particulièrement utiles aux pays les moins développés. M. QUINN prend bien note de la demande de la délégation roumaine.

M. MARÉCHAL voit un certain écueil dans le fait de répondre directement à la demande de la Roumanie. Il craint en effet que, en donnant des directives sur l'établissement et le financement d'un laboratoire national, certains Gouvernements n'interprètent mal la chose et y voient en quelque sorte un esprit dirigiste qui cherche à s'imposer de l'extérieur.

M. BLEVIN signale qu'un certain nombre de pays, parmi les plus développés, apportent leur aide aux pays en voie de développement. L'aide ainsi apportée permet de mettre ceux-ci, même si cela est de façon indirecte, en liaison avec ce qui se fait au BIPM au niveau le plus élevé. Par ailleurs, il se plaît à souligner que *Metrologia* va dans la direction demandée puisque cette revue a ouvert ses pages à des articles dont les sujets sont susceptibles de répondre à des besoins d'ordre très pratique qui n'exigent pas l'exactitude la plus élevée que l'on puisse atteindre en métrologie. M. Blevin pense lui aussi que la question soulevée par la délégation de la Roumanie doit être portée à l'ordre du jour du CIPM.

M. VANIER (Canada) se demande si la question posée l'est bien devant l'instance appropriée. À son avis, les préoccupations qu'elle implique sont du ressort d'autres organismes. En ce qui le concerne, il peut dire que le Canada apporte son aide à d'autres pays moins développés en y envoyant par exemple des techniciens chargés d'enseigner certaines techniques précises.

M. LYONS estime, lui aussi, que les organes de la Convention du Mètre ne sont pas ceux auxquels il faut s'adresser pour l'aide des pays en voie de développement. Les problèmes de ces pays sont d'un ordre beaucoup plus général, ce sont surtout des problèmes de formation qui ne sont pas de la compétence de la Conférence générale des poids et mesures.

M. KIND conclut en disant que le BIPM doit rester à l'écoute des besoins de tous les pays dans les domaines de la métrologie. Toutefois, c'est aux Gouvernements de prendre conscience de l'importance de la métrologie dans de nombreux secteurs, que ceux-ci soient commerciaux ou industriels. Le rôle des organes de la Convention du Mètre est peut-être d'aider les Gouvernements à prendre conscience de cette importance de la métrologie. D'un autre côté, il craint que chercher à avoir un rôle plus actif dans la solution des problèmes posés ne constitue une lourde charge sur le budget du BIPM.

M. MOSCATI (Brésil) souhaite que *Metrologia* publie des informations sur les réunions, les sessions spécialisées, les publications traitant de métrologie. Trouver des informations valables dans ce domaine lui paraît particulièrement difficile au Brésil.

M. BLOUET (France) constate que plusieurs des questions posées mériteraient une étude pour recevoir une réponse ultérieure. Il suggère que, avant la prochaine Conférence, le CIPM s'enquière de ce que les Pays membres attendent des organes de la Convention du Mètre. Cette enquête permettrait de savoir ce qu'il est possible ou non de faire.

M. KIND remercie M. Blouet pour sa suggestion dont il ne manquera pas de tenir compte lors de la préparation de la prochaine Conférence générale.

De l'avis de M. Maréchal, ce sujet est important pour la politique future concernant le BIPM.

M. KIND constate que, l'ordre du jour étant épuisé, les travaux de la Conférence générale touchent à leur fin. Il tient à remercier M. Maréchal pour la façon, à la fois souple et ferme, dont il a dirigé les débats. (*Applaudissements*).

M. MARÉCHAL remercie M. Kind de son compliment. Il estime que, s'il a su conserver une certaine souplesse, c'est à tous qu'il le doit. Une grande partie du mérite en revient à ceux qui ont assuré la préparation de cette Conférence, en particulier M. Kind, M. Kovalevsky et M. Quinn. Il tient aussi à remercier ceux qui ont œuvré avec diplomatie au sein du groupe de travail *ad hoc* chargé des questions financières. (*Applaudissements*).

La séance est levée à 16 h 50.

\*  
\* \*

À 18 h 30, les chefs de délégation à la Conférence générale ont été invités par l'Ambassadeur d'Allemagne à une réception donnée dans l'Hôtel de Beauharnais, à l'occasion de la Fête de l'Unité allemande.

---



---

## RÉSOLUTIONS

### ADOPTÉES PAR LA 19<sup>e</sup> CONFÉRENCE GÉNÉRALE \*

---

#### Étalons de temps et comparaisons de temps

##### RÉSOLUTION 1

La 19<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures,

*considérant* que l'exactitude des comparaisons d'horloges distantes a été grandement améliorée par l'utilisation des techniques spatiales,

*constate* que cette exactitude

— peut encore être améliorée grâce à une meilleure utilisation des techniques courantes faisant appel aux satellites,

— fait apparaître les différences entre étalons atomiques de fréquence et leurs variations systématiques,

— permet une meilleure synchronisation des échelles nationales de temps,

*recommande*

— que soient construits de nouveaux étalons primaires à césium, que soit améliorée l'exactitude de la fréquence des étalons primaires existants et que l'on étudie les différences systématiques de fréquence qui existent entre eux,

— que les laboratoires qui participent à l'établissement du Temps atomique international (TAI) assurent la constance des conditions d'installation et de fonctionnement de chacune des horloges qui contribuent au TAI, conservent soigneusement trace de ces conditions et les communiquent au Bureau international des poids et mesures,

— que les coordonnées adoptées pour les antennes utilisées pour les comparaisons d'horloges par satellite, à sens unique, correspondent à leur position réelle dans le système de référence terrestre du Service international de la rotation terrestre.

---

\* Pour la dotation du BIPM, voir page 91.

## L'effet Josephson et l'effet Hall quantique

### RÉSOLUTION 2

La 19<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures,

*considérant*

- que l'uniformité mondiale et la stabilité à long terme des représentations nationales des unités électriques sont particulièrement importantes pour la science, l'industrie et le commerce tant pour des raisons techniques que pour des raisons économiques,

-- que de nombreux laboratoires nationaux utilisent maintenant l'effet Josephson ou l'effet Hall quantique pour conserver leurs représentations respectives du volt ou de l'ohm, ce qui leur donne une sécurité accrue en ce qui concerne la stabilité à long terme,

- que les valeurs attribuées à leurs représentations doivent être en accord aussi étroit que possible avec les unités du SI,

*rappelant* la Résolution 6 de la 18<sup>e</sup> Conférence générale concernant les ajustements envisagés à l'époque pour les représentations du volt et de l'ohm,

*tenant compte* des décisions prises par le Comité international des poids et mesures en 1988, lors de sa 77<sup>e</sup> session, au sujet de ces ajustements, et en particulier des valeurs  $K_{J,90}$  (égale à 483 597,9 GHz/V) et  $R_{K,90}$  (égale à 25 812,807  $\Omega$ ) attribuées par convention, respectivement, à la constante de Josephson  $K_J$  lorsqu'elle est utilisée pour représenter le volt et à la constante de von Klitzing  $R_K$  lorsqu'elle est utilisée pour représenter l'ohm,

*recommande*

que les laboratoires nationaux poursuivent leurs efforts pour réduire l'incertitude sur la connaissance que l'on a des rapports  $K_{J,90}/K_J$  et  $R_{K,90}/R_K$ ,

- que soient poursuivies les recherches concernant la théorie fondamentale de l'effet Josephson et de l'effet Hall quantique.

**L'Échelle internationale de température de 1990 et les travaux futurs en thermométrie****RÉSOLUTION 3**

La 19<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures,

*considérant*

— que l'uniformité mondiale et la stabilité à long terme des mesures de température sont particulièrement importantes pour la science, l'industrie et le commerce, pour des raisons aussi bien techniques qu'économiques,

-- que l'échelle internationale de température doit être aussi proche que possible de la température thermodynamique,

*rappelant*

que, dans sa Résolution 7, la 18<sup>e</sup> Conférence générale avait invité le Comité international des poids et mesures et les laboratoires nationaux à préparer et adopter une nouvelle échelle internationale pour remplacer l'Échelle internationale pratique de température de 1968, dont on savait alors qu'elle s'écartait de façon significative de la température thermodynamique,

— que l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90) adoptée par le Comité international en 1989, lors de sa 78<sup>e</sup> session, est dans son ensemble plus précise, plus facile à réaliser et plus étroitement en accord avec la température thermodynamique et par conséquent satisfait aux exigences mentionnées dans la Résolution 7 de la 18<sup>e</sup> Conférence générale,

*recommande* aux laboratoires nationaux de poursuivre leurs efforts pour améliorer l'uniformité mondiale et la stabilité à long terme des mesures de température en mettant rapidement en œuvre l'EIT-90 et de maintenir le niveau de leurs programmes de recherche fondamentale en thermométrie.

**Préfixes SI zetta, zepto, yotta et yocto****RÉSOLUTION 4**

La 19<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures,

*décide* d'ajouter à la liste des préfixes SI pour la formation des noms des multiples et sous-multiples des unités, adoptée par la 11<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures (CGPM), Résolution 12, paragraphe 3, la 12<sup>e</sup> CGPM, Résolution 8 et la 15<sup>e</sup> CGPM, Résolution 10, les préfixes suivants :

Facteur par lequel l'unité est multipliée	Préfixe	Symbole
$10^{21}$	zetta	Z
$10^{-21}$	zepto	z
$10^{24}$	yotta	Y
$10^{-24}$	yocto	y

---



# **19th CONFÉRENCE GÉNÉRALE DES POIDS ET MESURES**

## **PROCEEDINGS**

### **Note on the use of the English text**

Following a suggestion made by a delegation at the 18th Conférence Générale des Poids et Mesures and to make them more accessible to the many readers who are more familiar with the English language than with the French, the proceedings of the 19th Conférence Générale are published in English as well as in French. Note, however, that the official version, particularly of the Resolutions voted by the Conférence, is the French one.

### **Note sur l'utilisation du texte anglais**

Suite à la suggestion faite par une délégation à la 18<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures et pour faciliter leur consultation aux nombreux lecteurs qui sont plus familiers avec la langue anglaise qu'avec la langue française, les Comptes rendus de la 19<sup>e</sup> Conférence générale sont présentés en anglais en même temps qu'en français. Il n'en demeure pas moins que la version officielle, en particulier des résolutions adoptées par la Conférence, est la version en langue française.



## CONVOCAATION

The 19th Conférence Générale des Poids et Mesures is hereby convoked for Monday the 30th of September 1991

### Constitution of the Conférence Générale des Poids et Mesures

Convention du Mètre (1875): Article 3 (\*)

The operation of the Bureau International shall be under the exclusive direction and supervision of a *Comité International des Poids et Mesures*, which latter shall be under the control of a *Conférence Générale des Poids et Mesures*, to be composed of the delegates of all the contracting Governments.

Rules annexed to the Convention du Mètre (1875): Article 7 (\*)

The Conférence Générale, mentioned in Article 3 of the Convention will meet in Paris on the convocation of the Comité International at least once every six years. Its task is to discuss and to initiate measures necessary for the propagation and improvement of the metric system, and to sanction new fundamental metrological determinations which may have been made between its meetings. It will receive a Report of the Comité International on the work accomplished and will proceed, by secret ballot, to the renewal of half of the Comité International.

Votes at the Conférence Générale take place by States: each State has the right to one vote.

The members of the Comité International have the right to take part in the meetings of the Conférence, they may at the same time be delegates of their Governments.

### Place and dates of sessions

All the sessions will take place at the  
Centre de Conférences Internationales, 19, avenue Kléber, Paris 16<sup>e</sup>  
in a room offered by the  
Ministère des Affaires Étrangères de France  
with simultaneous translation in French, English and Russian

First	session, Monday 30 September 1991	at 10 h.
Second	session, Monday 30 September 1991	at 15 h.
Third	session, Wednesday 2 October 1991	at 15 h.
Fourth	session, Thursday 3 October 1991	at 15 h.
Fifth	session, Friday 4 October 1991	at 10 h.
Sixth	session, Friday 4 October 1991	at 15 h.

A visit to the Bureau International followed by a reception at the Pavillon de Breteuil will take place on Tuesday 1st October 1991 at 15 h.

---

(\*) BIPM translation.

**PROVISIONAL AGENDA**

1. Opening of the Conference.  
Address by His Excellency the Ministre des Affaires Étrangères de la République Française.  
Reply by the President of the Comité International des Poids et Mesures.  
Address by the President of the Académie des Sciences de Paris, President of the Conference.
  2. Presentation of credentials by Delegates.
  3. Nomination of Secretary of the Conference.
  4. Establishment of the list of Delegates entitled to vote.
  5. Approval of the Agenda.
  6. Report of the President of the Comité International on the work accomplished.
  7. Length and the definition of the metre.
  8. Mass and related quantities : the Third Periodic Verification of national prototypes of the kilogram.
  9. The second and International Atomic Time.
  10. Electrical standards.
  11. Temperature, the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90).
  12. Photometry and radiometry.
  13. Ionizing radiations.
  14. The International System of Units (SI).
  15. Programme of future work at the Bureau International.
  16. Annual dotation of the Bureau International.
  17. Proposals from Delegates.
  18. Renewal of half of the Comité International.
  19. Other business.
-

## **NOTES ON THE PRINCIPAL POINTS OF THE AGENDA**

### **1. Opening of the Conference**

The date of the opening of the 19th Conférence Générale des Poids et Mesures is four years after the opening of the previous Conference. This interval is appropriate in view of the recent and still existing rapid rate of evolution in metrology resulting from advances in physics and technology.

### **2. Presentation of credentials by Delegates**

To ensure the proper running of the Conference it is desirable that the Bureau International be informed of the composition of each Delegation at least two weeks before the opening of the Conference.

On their arrival, Delegates are asked to present their credentials to the Conference Secretariat.

### **6. Report of the President of the Comité International des Poids et Mesures on work accomplished**

Article 19 of the Rules Annexed to the Convention du Mètre stipulates that « The President of the Comité International will give the Conférence Générale an account of work carried out since the time of the last meeting ».

In his Report the President will draw the attention of the Conference to the important changes that have taken place in metrology in recent years. The increasing use of means, based upon atomic and quantum phenomena, of maintaining reproducible but independent laboratory reference standards has allowed much more reproducible measurements to be made both in national laboratories and in industrial laboratories than was the case in the past. The role of the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) as the central laboratory for international comparisons of these and other standards has been examined in the light of the increasing need for worldwide traceability of standards of measurement at the highest levels of accuracy. The consequences of all these developments for national laboratories, national calibration services and the BIPM will be reviewed.

### **7. Length and the definition of the metre**

The provision of highly accurate and convenient standards for length measurement, in all its aspects, remains one of the central tasks of national laboratories. To this end the definition of the metre adopted in 1983 was accompanied by a document giving indications on its practical realization which included a list of recommended radiations for use as length standards at the highest levels of accuracy. Since 1983 work has been carried out in national laboratories and at the BIPM to extend our knowledge of the behaviour of lasers used as wavelength standards. New measurements of many of the recommended wavelengths have been made and, in at least one case, proposals for modification of the adopted value are likely. In addition, other radiations

at different wavelengths are being studied with a view to adding them to the list of recommended wavelengths. Following upon the new definition of the metre in 1983 there was a reduction in the demand for international comparisons of lasers which had been a major feature of our activity in the years preceding the new definition. In 1988, however, a new series of comparisons was begun; these have included most of the various lasers emitting the recommended radiations of the *mise-en-pratique* of the definition of the metre. The period from 1983 until 1988 had allowed the BIPM to construct and test its own lasers, and these are now being used to carry out the comparisons.

Despite the now widespread use of commercial optical interferometers for industrial length measurement, line and end standards still play a major role in such measurements and there is an increasing demand for calibration of one-metre line scales at the BIPM.

#### **8. Mass and related quantities; the Third Periodic Verification of national prototypes of the kilogram**

In accordance with Resolution 7 of the 18th Conférence Générale, the Third Periodic Verification of national prototypes of the kilogram began in September 1988 and is expected to end in 1991. So far, more than thirty member nations of the Convention du Mètre have sent their national prototypes to the BIPM. The first part of the Verification consisted of the comparison of the international prototype with its six official copies [« témoins »] and the working standards of the BIPM. The international prototype and its copies were first compared with two of the BIPM working standards, then cleaned and washed using the established BIPM procedures before being compared again with the working standards. The changes observed in the mass of the international prototype and its copies resulting from the cleaning and washing were well within the limits to be expected after the time of storage. Subsequent measurements, however, showed that the international prototype, one of its copies and two other platinum-iridium kilogram standards increase in mass in the few months following cleaning and washing by about 1 µg per month. This is about ten times the long-term rate of increase deduced from measurements made at the BIPM on platinum-iridium standards stored for periods of up to ninety-five years.

The Comité International des Poids et Mesures (CIPM), at its meeting in 1989, discussed the consequences of this observation and its practical implications for the Third Verification. The CIPM decided, in agreement with original practice, that for the purposes of the Third Verification the kilogram is the mass of the international prototype just after cleaning and washing using the BIPM procedures. A report on the progress of the Third Verification will be presented at the 19th Conférence Générale. A programme of work is underway at the BIPM and in a number of national laboratories aimed at obtaining a better understanding of the processes that lead to changes in mass of platinum-iridium mass standards. Other studies are also underway aimed at improving the metrological characteristics of balances and at investigating the stability of some stainless-steel alloys as mass standards.

The Comité International, with its Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées, has continued to work to improve the uniformity of measurements of force, pressure, density and acceleration due to gravity. In respect of the last of these, intercomparisons of absolute gravimeters have been carried out at the BIPM in collaboration with the International Union of Geodesy and Geophysics. A full report on mass and related quantities will be presented to the Conférence Générale.

## 9. The second and International Atomic Time

The 18th Conférence Générale in Resolution 3 approved the decision of the CIPM to take over responsibility for International Atomic Time (TAI) from the Bureau International de l'Heure (BIH). The BIH has since formally ceased to exist and was replaced on 1st January 1988 by a new service concerned only with Earth rotation, the International Earth Rotation Service. The new BIPM Time Section thus became responsible for TAI and for the diffusion of both TAI and Coordinated Universal Time (UTC) on 1st January 1988. By that time the Time Section was fully installed at the BIPM, the necessary computers and communication equipment having been in operation since mid 1985 when the move from the Paris Observatory took place.

Since the 18th Conférence Générale in 1987, important advances have been made in the accuracy and accessibility of TAI. These have been due in large part to the increasing use of the Global Positioning System satellites (GPS) for time transfer.

It has now become clear, due in part to the work of the BIPM, that the full exploitation of GPS for time comparison can lead to an improvement of more than a factor of ten in the accuracy with which national time scales can be compared. However, the exploitation of the new, highly accurate data that are now available has significantly increased the work load on the BIPM and, in addition, has led the Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS) to make a number of proposals that are leading to further demands on the time of the staff. The BIPM now draws up the international programme for satellite tracking and treats the major part of the data. Various research programmes have been started at the request of the CCDS to improve still further the accuracy in time comparisons by improving the consistency of the coordinates of laboratory antennas, and exploiting ionospheric measurements and precise ephemerides of satellites. Other studies are necessary if we are to minimize the effects of the intentional degradation in GPS soon to be imposed on civil users of the system; this will involve dealing with the Soviet system, GLONASS, with commercial communications satellites and the use of very-long-baseline interferometers for time transfer.

This new and close involvement of the BIPM staff in the practical aspects of a variety of types of time transfer is the reason that the CIPM accepted the recommendation of its Comité Consultatif and decided to take steps to install a time reference at the BIPM using commercial caesium clocks. The CIPM considers it important to maintain at the BIPM a high level of competence in the coordination of the time comparisons which provide the basis of TAI. Practical experience at the BIPM in such time comparisons is already desirable and in the future will become essential. The CIPM noted that present experience has been gained thanks to facilities generously provided by the Paris Observatory and is being maintained with the help of a caesium clock generously loaned for a period of up to two years by the US Naval Observatory (Washington D.C.). The purchase of commercial caesium clocks and the necessary time comparison equipment, now considered necessary, was not foreseen in the budget approved by the 18th Conférence Générale. A proposal is now being made by the CIPM to the 19th Conférence Générale for a special increase in the dotation that will provide funds for the initial purchase of two caesium clocks and associated time comparison equipment, and will make possible a long term commitment in terms of facilities and staff to the maintenance and improvement of the equipment as the need arises. It should be noted that no clock installed at the BIPM is or will be included in the ensemble of clocks forming the basis of TAI.

Although improvements in the performance of primary caesium clocks has not been very marked in recent years, it now appears that rapid advances are likely in

the not too distant future, most particularly in the stability of such clocks. Realizing the benefits offered by such increased stability will require more precise time comparisons and new studies on the physics used to establish TAI. It should be noted that at the highest level of accuracy, the metrology of time must be treated in a relativistic framework. At present the theory can be applied in a straightforward way for clocks on the ground but its application will become much more complicated as the accuracy of clocks improves. Difficulties are already met in space and astronomical applications of TAI. Despite the fact that the measurement of time is already by far the most accurate of any physical quantity, current accuracy does not entirely meet the needs of today's science and technology and falls short of what is likely to be required in the future.

Acting on the advice of the CCDS, the CIPM has adopted a number of Recommendations to guide the work of the national laboratories and to assist the BIPM in its task of improving the accuracy, uniformity and accessibility of TAI and UTC. These Recommendations are summarized in Draft Resolution A presented to the Conférence Générale.

#### **Time standards and time comparisons**

##### *Draft Resolution A*

The 19th Conférence Générale des Poids et Mesures.

*noting* that the accuracy of clock comparisons has been greatly improved by the use of satellite techniques,

*remarks* that this accuracy

- can be further improved by the better use of the satellite techniques already developed,
- reveals the differences and systematic variations among atomic frequency standards.
- allows a better synchronization of national time scales.

*recommends*

- the construction of new primary caesium standards, the improvement of the frequency accuracy of existing primary standards and the study of the systematic differences in frequency which exist between them.

that the laboratories participating in International Atomic Time (TAI) stabilize the environmental conditions of each contributing clock, keep careful records of these environmental conditions and report them to the Bureau International des Poids et Mesures.

that the coordinates adopted for antennas used in single-way time comparison by satellite techniques correspond to their real position in the terrestrial reference system of the International Earth Rotation Service.

#### **10. Electrical standards**

In conformity with the instructions given to it by Resolution 6 of the 18th Conférence Générale concerning international agreement on national representations of the volt and the ohm, the Comité International adopted two Recommendations in 1988 in which it defined and attributed the conventional values  $K_{J-90}$  and  $R_{K-90}$  to the Josephson constant  $K_J$  and the von Klitzing constant  $R_K$  respectively to come into effect on 1st January 1990. These values are given in draft Resolution B presented

here. The CIPM has taken care to point out that in defining these new constants it does not redefine the SI volt or the SI ohm. To make this quite clear the Comité International gave explicit instructions on how the new representations of the volt and the ohm should be referred to and on what symbols should and should not be used.

The implementation of the CIPM Recommendations concerning  $K_{J-90}$  and  $R_{K-90}$  on 1st January 1990 had the immediate effect of producing a very significant improvement in the worldwide consistency of electrical measurements. This improvement involved changes that were at a level visible to many scientific and industrial users of electrical measuring equipment. Among those national laboratories which have established standards of the volt and the ohm based upon the Josephson and quantum Hall effects, consistency is now estimated to be better than 5 parts in  $10^8$  — although this is still being tested by an international comparison being carried out at the BIPM. The accuracy of realization of the SI volt and ohm is, however, estimated to be only at the level of about 4 parts in  $10^7$ . Further work on the realization of the SI electrical units is therefore desirable. To this end Draft Resolution B has been prepared.

### The Josephson and quantum-Hall effects

#### *Draft Resolution B*

The 19th Conférence Générale des Poids et Mesures,

#### *considering*

— that worldwide uniformity and long-term stability of the national representations of electrical units are of great importance for science, industry and commerce for both technical and economic reasons,

— that many national laboratories now use the Josephson and quantum-Hall effects for the conservation of their representations of the volt and the ohm respectively, a practice giving complete security in terms of long-term stability,

- that the values attributed to their representations should be in as close as possible agreement with the SI,

*recalling* Resolution 6 of the 18th Conférence Générale concerning adjustments then foreseen in representations of the volt and the ohm,

*noting* the decisions made by the Comité International des Poids et Mesures in 1988, during its 77th Meeting concerning these adjustments, in particular the conventional values  $K_{J-90}$  (equal to 483 597,9 GHz/V) and  $R_{K-90}$  (equal to 25 812,807  $\Omega$ ) attributed to the Josephson constant  $K_J$  and the von Klitzing constant  $R_K$  used in representations of the volt and the ohm respectively,

#### *recommends*

- that national laboratories continue their efforts to reduce the uncertainty in the knowledge of the ratios  $K_{J-90}/K_J$  and  $R_{K-90}/R_K$ ,

-- that research be continued into the basic theory of the Josephson and quantum-Hall effects.

## 11. Temperature, the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)

In conformity with instructions given to it in Resolution 7 of the 18th Conférence Générale, the CIPM acting on the advice of its Comité Consultatif de Thermométrie adopted in 1989 the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) to come into force on 1st January 1990, the date on which the definitions of  $K_{J-90}$  and  $R_{K-90}$  relating to representations of the electrical units also came into force. To accompany the text of the ITS-90 two further documents have been prepared « Supplementary Information for the ITS-90 » and « Techniques for Approximating the ITS-90 ». It is the intention of the CIPM that these documents, which are published by the BIPM, will be periodically updated. In Draft Resolution C, the CIPM asks the 19th Conférence Générale to draw attention to the adoption of the ITS-90 and to call for a continuation of research programmes on fundamental thermometry.

### The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) and future work in thermometry

#### *Draft Resolution C*

The 19th Conférence Générale des Poids et Mesures,

#### *considering*

— that worldwide uniformity and long-term stability in the measurement of temperature are of great importance for science, industry and commerce for both technical and economic reasons,

— that the international temperature scale should be as close as possible to thermodynamic temperature,

#### *noting*

— that the 18th Conférence Générale in its Resolution 7 had invited the Comité International des Poids et Mesures and national laboratories to prepare and adopt a new international scale to replace the International Practical Temperature Scale of 1968, by then known to differ significantly from thermodynamic temperatures,

— that the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) adopted by the Comité International in 1989 at its 78th Meeting is generally more precise, more readily realized and more nearly in accord with thermodynamic temperatures, and that it fulfils the requirements demanded of it by Resolution 7 of the 18th Conférence Générale,

*recommends* that national laboratories continue their efforts to improve the worldwide uniformity and long-term stability in the measurement of temperature by the rapid implementation of the ITS-90 and the maintenance of research programmes on fundamental thermometry.

## 12. Photometry and radiometry

At the time of the adoption of the new definition of the candela by the 16th Conférence Générale in 1979, it was agreed that international comparisons should take place with the aim of monitoring the results obtained using the new definition. At the 18th Conférence Générale a report was given on the results of these international comparisons. The general conclusion was that the uniformity of realizations of the candela had been slightly improved, but that many more laboratories using a variety of methods participated in the comparisons than had been the case under the old definition. Since the 18th Conférence Générale significant advances have been made in various aspects of detector-based radiometry, and particularly spectro-radiometry,

and a number of laboratories now base their realization of the candela on these new techniques. The CIPM, responding to requests made over a number of years by its Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie, decided in 1985 that much of the effort then devoted to thermometry at the BIPM should be transferred to radiometry. This decision was reported to the 18th Conférence Générale and the progress of the new work on spectro-radiometry and plans for the future will be presented to the 19th Conférence Générale.

### 13. Ionizing Radiations

The Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants (CCEMRI) and the ionizing radiations laboratories of the BIPM play a dominant part in coordinating the work of the national laboratories in this domain, and they have materially contributed to the improvements in the metrology of ionizing radiations that have taken place over the past thirty years. The metrology of ionizing radiations differs from that of many other quantities because of the special characteristics of the interaction of ionizing radiations with matter, in particular with the human body. The effects of ionizing radiations depend upon the type of radiation, its intensity and its energy and what is known in one domain cannot, in general, be simply extended to another. For this reason the establishment of accurate standards is complex and time consuming. It is nevertheless essential that reliable measurements of absorbed dose be made in the field of human dosimetry and therapy, where the requirements for accuracy come very close to the best that is possible. The widespread use of ionizing radiations in science and technology also calls for the availability of accurate measurements. To meet these demands the CCEMRI continues to initiate a wide range of international comparisons organized for the most part by the BIPM. Following the decision of the CIPM in 1985 to concentrate the effort at the BIPM in just two fields of work, radioactivity and dosimetry, new work has begun in these fields while maintaining a minimum effort in the field of neutrons. A report on the activities of the CCEMRI and the BIPM in these fields will be presented to the 19th Conférence Générale.

### 14. The International System of Units (SI)

The BIPM has published the sixth edition of the brochure «The International System of Units (SI)» prepared by the Comité Consultatif des Unités (CCU).

The principal additions to this new edition concern the adoption by the CIPM of the conventional values for the Josephson constant  $K_J$  and quantum-Hall constant  $R_K$  and a note on the International Temperature Scale of 1990. A few minor editorial changes were also made. Like the fifth edition, the sixth is a bilingual French/English edition.

The President of the CCU will make a report to the 19th Conférence Générale on the various questions that have been submitted to this Comité Consultatif since the previous Conférence Générale. In particular requests were made to extend the list of SI prefixes to be used for multiples and submultiples of SI units and the CIPM now makes such a proposal in Draft Resolution D.

**SI prefixes zetta, zepto, yotta and yocto***Draft Resolution D*

The 19th Conférence Générale des Poids et Mesures

*decides* to add to the list of SI prefixes to be used for multiples and submultiples of units, adopted by the 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), Resolution 12, paragraph 3, the 12th CGPM, Resolution 8 and the 15th CGPM, Resolution 10, the following prefixes :

Multiplying factor	Prefix	Symbol
$10^{21}$	zetta	Z
$10^{-21}$	zepto	z
$10^{24}$	yotta	Y
$10^{-24}$	yocto	y

**15. Programme of future work at the BIPM**

A detailed programme of the work to be carried out at the BIPM during the years 1993 to 1996 will be proposed by the Comité International in a document entitled « Programme of work and budget of the Bureau International des Poids et Mesures for the years 1993-1996 » which will be sent as a complement to this present document.

**16. Annual dotation of the Bureau International des Poids et Mesures**

Detailed financial estimates are given in the document mentioned above. Its conclusions can be summarized as follows.

The 18th Conférence Générale decided to increase the annual dotation of the BIPM by 5 % per year from 1989 to 1992. Thanks to the slowing down of price-inflation which had occurred during the latter half of the previous four-year period, 1985-1988, the Comité had been able to propose to the 18th Conférence Générale the taking over from the Bureau International de l'Heure complete responsibility for the then current work on TAI without asking for a special increase in the dotation. In recent years TAI, quantum-based voltage and resistance measurements, length measurements based upon stabilized lasers, and energy-based spectral radiometry have entailed an enormous increase in the scope and the intellectual breadth of the BIPM's scientific work. This has required a corresponding broadening of the fields of competence of the scientific staff and was responsible for the pressing need for a new library and additional office space that led the Comité International to proceed with the new building, the Nouveau Pavillon, that was under construction at the time of the 18th Conférence Générale and was inaugurated in October 1988. The construction of the new building and the increase in the proportion of the more highly qualified members of the scientific staff, while necessary and rewarding have been costly. Another and significant cost increase has been the need to increase substantially the staff pension fund in order to render it actuarially sound in preparation for the heavy charges on the fund which will occur towards the end of the 1990's and during the first decade of the next century.

The annual dotation voted by member governments has been sufficient to meet most, but not quite all, of these costs, and a contribution has had to be taken from assets. These have in consequence fallen to about two thirds of annual budget, a level which the Comité International considers to be too low.

Furthermore, consequent upon the decision of the German Democratic Republic to become part of the Federal Republic of Germany the dotations for 1991 and 1992 are reduced by its contribution, namely 1,75 % and thus become 19 454 000 gold francs <sup>(1)</sup> and 20 427 000 gold francs respectively.

Since science and technology are becoming progressively more complex, the BIPM can only carry out its function effectively through a corresponding continuous development. The BIPM must advance and continue to adapt its programme to meet the evolving needs of the national laboratories of the member nations of the Convention du Mètre. In its proposal for the dotation for the years 1993 to 1996 the Comité International has restricted any extension of the work at the BIPM to the minimum consistent with the foreseen demands of the users and the only area of scientific work for which the Comité asks for an increase in real terms is for that related to TAI. The amount requested is 625 000 gold francs which is to be added to the starting point for the calculation of the dotation for the years 1993-1996. This increase will be used initially to finance the purchase of the clocks and associated equipment necessary to establish a BIPM time station and in future years will provide the resources necessary to maintain and improve the station in the terms requested by the CCDS.

For the BIPM as a whole, while no other extension to the programme is foreseen, continual changes and improvement in equipment and buildings must continue. Past experience has shown that an increase of 2 % per annum in the total budget above the overall rate of price increase in France has been the minimum necessary for the BIPM to work at a constant level of activity while still maintaining the essential and necessarily increasing level of competence.

With the expectation of annual price inflation in France remaining at or below 5 %, the Comité International proposes, therefore, an annual increase of 7 % in the dotation of the BIPM in the years 1993 to 1996.

Thus, the Comité proposes as the starting point for the calculation of the dotation for the years 1993 to 1996 the sum of 21 052 000 gold francs. This is obtained by taking the dotation for 1992 voted by the 18th CGPM, namely 20 791 000 gold francs, reducing it by 1,75 %, giving 20 427 000 gold francs, and then adding 625 000 gold francs. On this basis the Comité International asks the Conférence Générale to increase the dotation for the years 1993-1996 by adopting the following values :

1993 :	22 526 000 gold francs
1994 :	24 103 000 gold francs
1995 :	25 790 000 gold francs
1996 :	27 596 000 gold francs.

However, if the expectation of annual price inflation in France changes significantly before the 19th CGPM, the CIPM might adjust this proposal accordingly.

#### 17. Proposals from Delegates

Delegates from Member States are requested to let the Comité International know of their wishes or any proposals they would like to submit to the Conférence Générale as soon as possible but in any case at least six months before the Conférence (decision of the 7th Conférence Générale (1948): «the wishes or proposals thus

---

<sup>(1)</sup> Since 1969 the exchange rate between the gold franc and the French franc has remained unchanged at 1.814 52 French franc for one gold franc.

deposited will be distributed by the bureau of the Comité to all Member States of the Convention at least four months before the opening of the Conference so that Delegates may receive the necessary instructions and authority. All other wishes and proposals will be presented to the Conference only if the Comité has time to study them and has approved them »).

#### 18. Renewal of half of the Comité International

In conformity with Articles 7 (1875) and 8 (1921) of the Rules Annexed to the Convention du Mètre, the Conference will proceed by secret ballot to the renewal of half of the membership of the Comité International. Outgoing members are first those who in the case of vacancies have been provisionally elected since the last Conference, and second those selected by ballot from among the remaining members of the Comité. Outgoing members are eligible for re-election.

December 1990

*For the Comité International des Poids et Mesures,  
Pavillon de Breteuil, F-92312 Sèvres Cedex*

J. KOVALEVSKY  
*Secretary*

D. KIND  
*President*

---



## AGENDA OF THE CONFÉRENCE GÉNÉRALE

19th Meeting · 1991

---

The provisional agenda (*see* p. 102) is adopted.

---

FIRST SESSION  
OF THE 19th CONFÉRENCE GÉNÉRALE  
DES POIDS ET MESURES

Monday 30 September 1991, 10 h

---

Monsieur Hubert CURIEN, His Excellency the Ministre de la Recherche et de la Technologie, opened the Conference with the following address :

« MR PRESIDENT,  
« DELEGATES,

« On behalf of the Government of the French Republic, I have the honour to open this 19th Conférence Générale des Poids et Mesures.

« As the Minister of Research, it is a great pleasure to be with you this morning to welcome these distinguished physicists and directors of research laboratories and to wish them every success in their work. My welcome embraces all the delegations but in particular that of New Zealand, which is participating for the first time at this Conference.

« First of all I would like to pay tribute to the work of metrologists and to draw attention to some aspects of their methods.

« Contrary to what too many people believe, seeing you as rather « conservative » in the most derogatory sense of the term, you are in fact innovators on the lookout for any new scientific developments that you can apply to metrology.

« The report of the President of the Comité International gives some very good examples of this :

- stabilization of laser frequency to  $10^{-11}$  over a period of several years ;
- research on new clocks : cooled ions or millisecond pulsars ;
- use of the Josephson effect to measure electrical potential and the quantum-Hall effect in the comparison of resistance standards ;
- use of high-temperature superconductors.

« However, while you make use of research and advanced technology, you do so with great caution and you resist the temptation to introduce changes in the units with each new discovery. As regards the choice of practical realizations, too, you do not abandon one base point until a new one is completely proven and the transition can be effected smoothly. This caution is justified by the heavy responsibility you bear, notably with regard to your research colleagues from all the other disciplines who would be plunged into chaos if one of the standards you supplied happened to fail. As a scientist myself, I fully appreciate the importance of this responsibility.

« The community of users is becoming more and more indistinguishable from the industrial community. Precision metrology is becoming more and more important in day-to-day applications. It is needed more and more in the modern industrial network. It guarantees the fairness of commercial transactions and provides a common language for subcontractors and their suppliers.

« You work in an exemplary spirit of international cooperation, which has never wavered since the signing of the Convention du Mètre : it is one of the fields in which international solidarity shows its best face. The sharing of knowledge and experience is very profitable for all, large countries as much as those of limited size and means but whose need for metrology is just as great. This Conference is one of the manifestations of this solidarity.

« By making use of the possibilities offered by the latest advances in physics, metrology builds a bridge between research and industrial applications : it provides companies with the means to carry out measurements at the highest level of accuracy, as required for development in high technology fields (space and telecommunications, for example). Metrology is also a very powerful means of bringing together the different scientific communities, such as physics, chemistry and all the other sciences which increasingly use measurement and units. The definitions of the units form a bond between the sciences and facilitate unification.

« By way of conclusion I should like to emphasize that quality control, which is one of the major preoccupations of industry in every country, can only be achieved if founded on a basis of irrefutable and comparable measurement, and that only the universal language of metrology can guarantee constant progress in the field of quality control.

« Through the dissemination of your decisions through the systems of standards of different countries, you influence measurement virtually worldwide ; your responsibility, as I have already pointed out, is thus considerable. I would like by my presence today at the opening session of your Conference to demonstrate that the French Government is fully aware of the importance of your work, as are the governments of the other states which have signed the Convention du Mètre. Knowing your competence and the spirit in which you carry out your work, I am sure that this Conference will have the success I wish for it. »

Prof. D. KIND, President of the Comité International des Poids et Mesures, replied as follows :

« MINISTER,

« I take particular pleasure in thanking you for your speech of welcome. It was not simply an official speech on behalf of your Government but the warm welcome of someone who knows our field well. It is true that up to a point we must remain 'conservatives' because, as you have emphasized, it is better not to change the units or their means of realization too frequently, but at the same time we must be aware of all breakthroughs and advances in technology. The Convention du Mètre was signed over a hundred years ago. The organs which grew from it have always received the support and even the protection of the French Government. We are very much

indebted to your country. As time has gone by, the Convention du Mètre has proved its worth. I hope that over the next few days it will once again prove its effectiveness. Thank you for your good wishes. »

Prof. J. HAMBURGER, President of the Académie des Sciences de Paris and President of the Conference, then gave the following address :

« MINISTER,

« LADIES AND GENTLEMEN,

« It is a great honour for the President of the Académie des Sciences to introduce your working sessions. As this President has devoted his research only to questions of life, he is scarcely entitled to talk about weights and measures. Yet it all began with the human body. The Greeks measured small distances in fingers, thumbs, feet and paces. The *palaiste* the width of the hand, the *spithamê* the widest span between thumb and little finger, and the *orguia* the distance from the tip of one outstretched arm to the other. Parodying the famous dictum of the Greek sophist Protagoras, one could say that man was the measure of all things. And yet the study of man was the last to benefit from the concept of measurement. Biology and medicine were not familiar with measurement, they remained almost completely qualitative until the last century. It was known that blood contained red corpuscles, but it was not until 1855 that the Austrian, Cramer, realized that it would be advisable to count them. And the importance of the precise proportions of the molecules making up our bodies was not understood until shortly before 1900. You weighers and measurers, who have carried out such excellent work in so many fields over such a long period, have contaminated biologists and doctors only in the last few decades.

« But this contamination has had devastating effects. Like Prince Charming awakening Sleeping Beauty, dormant for centuries, measurement has shaken biology and medicine from their sleep and transformed them. I should like to tell you one or two stories to illustrate this marvellous transformation.

« There was once a young Dutchman named Willem Kolff who was completing his medical studies when the last war broke out. Willem went to work in Kampen, a very old town with a population of twenty thousand, lying in the depths of the Zuyderzee where the Dutch had created fertile polders on land wrenched from the sea. In the hospital to which he was seconded, life under the Occupation was not exactly busy and Willem had plenty of time to dream. A problem which had distressed doctors for over a century came to his mind – uraemia. It was known that in cases of renal failure urea is no longer eliminated by the kidneys and spreads through the body, and that many patients died of this condition after a long and terrible illness. Under his care there was a farmer, uraemic, almost blind, suffering from constant headaches, continually gripped by painful attacks of vomiting. It occurred to our young doctor that extracting some of the urea that was poisoning the farmer's blood would perhaps give him some relief. He had read the work of three Americans. Abel, Rowntree and Turner, who had succeeded in extracting urea from rabbits' blood by passing it through collodion tubes immersed in a saline solution, the urea diffusing through the tubes into the solution. Could not this technique of dialysis be applied to the uraemic man? Kolff thought that an attempt should be made to construct an artificial kidney on this principle.

« He sought out the director of a small local factory plunged into semi-idleness by the war and the Occupation, and its workers, with time on their hands, enthusiastically set about building a huge machine in which blood taken from a vein could circulate for 20 metres through a cellophane tube immersed in a solution of salted water. The machine was tested on fifteen uraemia patients. Kolff was delighted to see that a large quantity of urea could be extracted in this way and that the urea level in the blood fell considerably. Alas, his satisfaction was short-lived, as the condition of the patients scarcely improved and eventually they all died. Similar trials carried out in the United States and in Sweden came up against the same stumbling block.

« It was then that more accurate and comprehensive measurement provided the key to this failure. The quantitative spirit was to come into its own.

« As the rest of this story took place largely in Paris, in the research unit which I was then running at the Hôpital Necker, I remember it very clearly. We no longer analysed only the level of blood urea with uraemic patients. Almost all the chemical components of the blood were repeatedly measured. It was noted that kidney failure caused many forms of disequilibrium besides the build-up of urea. It emerged from these analyses that the kidney is by no means just a simple apparatus for the elimination of undesirable wastes such as urea. Its responsibility is much wider -- nothing less than to rigorously maintain the chemical composition of the organism at a constant level, or at any rate to keep fluctuations within the narrow margins compatible with a healthy body. These were the main conclusions drawn from the measurement of body sodium, potassium, magnesium, calcium, chlorine, phosphates, sulphates and water. Here was an explanation for the failure of the early artificial kidneys. As soon as it was known that all these different components should be checked in uraemic patients, victory was at hand. In the next set of statistics we published, we were able to claim a 93 % success rate in dialysis by the artificial kidney, with complete cures in 150 cases of acute uraemia. Shortly afterwards, in the same way, we were able to control chronic uraemia and allow men and women whose two kidneys had completely ceased to function, or had even been surgically removed, to lead a semi-normal life. This was, it seems to me, the triumph of weights and measures of the human body.

« Then there is the case of an injured man whose legs had been buried under a heap of metal. It was hours before his crushed limbs could be freed, by which time they looked pallid, swollen, numb and cold. He was taken to hospital in a state of extreme shock, with a feeble pulse and very low blood pressure. Almost always after a great shock the organs will for some days lose their power to regulate basic bodily functions. An injured person can survive if this danger period is safely past. But before healing has a chance to take place, there are two, three or four long weeks to get through, during every minute of which the patient's life is in danger. Like a ship adrift, the organism deprived of its regulatory systems is at great risk unless the medical team takes over their role throughout the critical period.

« The technique is based on the measurement, once or several times a day, of a list of predetermined values: thus the concentration of oxygen, carbon dioxide, urea, sodium, chlorine, potassium, bicarbonates, calcium, glucose, hydrogen ions and ten other values which experience has shown to be dangerous if they diverge from certain recognized limits, will be regularly measured in the blood, an accurate indicator of body liquids. At the same time the various body wastes, the blood pressure in the arteries and veins, the constants which warn of incipient haemorrhage or, inversely, of excessive clotting of the blood, are measured and evaluated. Forgive me for not

going into greater detail. Suffice it to say that the results have to be available at short notice. Laboratories have consequently had to update their methods in order to supply virtually instantaneous results. Moreover, this mass of quantitative information has to be classified and recorded in a kind of log, which I think our team was the first to perfect, but which is now used in all reanimation centres. The technique I have just described is the one which, in the 1950s, I suggested should be called 'réanimation médicale', and is known as 'intensive care' in English.

«As soon as the measurements being checked deviate excessively from the norm, corrective action is taken. Appropriate drips, artificial respiration machines, electrical stimulation of the heart, various types of artificial kidney may be used, not to mention a range of powerful medicines which today enable most of the values affected by accident or illness to be controlled.

«The results are, in the main, remarkable. Just a few years ago, a man with crushed limbs had virtually no chance of survival. Today, recovery is the norm. Similarly, a hundred other diseases which were fatal twenty years ago are now almost always curable and, what is more, there is less chance of relapse. All that was required was the control of a few dozen chemical and physical data on the sick person in order to save a life. Once again, the weights and measures of the body triumph.

«Thus the history of biology and medicine prove the general rule: the discipline to which you subscribe, that of measurement, is the great inseminator of science. Perhaps even those who seek a definition of science could find it in your approach to the world. There is no science which is not quantitative. Man knows the world only through the impression he makes on it. And this impression, in large part, is made through weights and measures.

«During the next four days you are going to refine this art of yours. On behalf of the Académie des Sciences I offer you my warmest good wishes.»

\*  
\* \*

After an interval of some twenty minutes, the Conference reconvened under the Presidency of Prof. A. MARÉCHAL, Member of the Académie des Sciences de Paris and former member of the Comité International des Poids et Mesures, Prof. J. Hamburger having other commitments.

2. 3. 4. Following a proposal by Prof. Maréchal the 19th Conférence Générale nominated, by acclaim, Prof. J. KOVALEVSKY, Secretary of the CIPM, as Secretary of the Conference.

As the credentials for all delegations had been presented in advance, the Secretary proceeded to the establishment of a list, by member state, of those delegates eligible to vote. This list, in alphabetical order (in the French language), is as follows :

Germany .....	S. GERMAN
United States of America .....	J. W. LYONS
Argentina .....	R. STEINBERG

Australia .....	W. R. BLEVIN
Austria .....	R. GALLE
Belgium .....	H. VOORHOFF
Brazil .....	G. MOSCATI
Bulgaria .....	V. GAVRAILOV
Canada .....	J. VANIER
China (People's Rep. of) .....	Bai Jingzhong
Korea (Rep. of) .....	Seung-Duk PARK
Denmark .....	H. H. JENSEN
Egypt .....	M. M. AMMAR
Spain .....	J. A. FERNANDEZ HERCE
Finland .....	Mrs U. LÄHTEENMÄKI
France .....	J. BLOUET
Hungary .....	D. BELEDI
India .....	Mrs S. SINGH
Indonesia .....	G. M. PUTERA
Ireland .....	J. LAWTON
Israel .....	A. SHENHAR
Italy .....	M. MURGO
Japan .....	S. HATTORI
Mexico .....	A. PORTAL ARIOSA
Norway .....	K. BIRKELAND
New Zealand .....	A. C. CORNEY
Netherlands .....	G. J. FABER
Poland .....	Z. REFEROWSKI
Portugal .....	M. VICENTE
Romania .....	N. DRAGULANESCU
United Kingdom .....	P. B. CLAPHAM
Sweden .....	K. SIEGBAHN
Switzerland .....	B. VAUCHER
Czechoslovakia .....	V. SULÍK
Thailand .....	P. THENANONTA
Turkey .....	A. EREN
USSR .....	V. I. POUSTOVOIT
Yugoslavia .....	M. EŽOV

Of the forty-seven states which have signed the Convention du Mètre, thirty-eight were represented.

### 5. Approval of the agenda

The provisional agenda proposed in the Convocation was adopted with a change in the order of item 18 (Renewal of one half of the Comité International) which was to be taken after item 14.

6. The PRESIDENT asked Prof. KIND, President of the CIPM, to present his report.

**Report of the President of the  
Comité International des Poids et Mesures  
on the work accomplished since the 18th Conférence Générale  
(October 1987 — September 1991)**

In conformity with Article 7 of the Rules annexed to the Convention du Mètre it is my pleasure as President of the Comité International des Poids et Mesures to report to the 19th Conférence Générale on the work accomplished since the 18th Conférence Générale. This Report, therefore, covers the four years that have passed since October 1987.

This has been a period of intense activity for the Comité International, its Comités Consultatifs and the BIPM. On 1 January 1990 the International Temperature Scale of 1990, the ITS-90, came into force replacing the International Practical Temperature Scale of 1968 (IPTS-68) and the Provisional 0,5 K to 30 K Temperature Scale of 1976 (EPT-76). The ITS-90 was adopted by the CIPM in September 1989 on the proposal of its Comité Consultatif de Thermométrie (CCT). I draw your attention to draft Resolution C concerning the ITS-90 and future work in thermometry. Also on 1 January 1990 conventional values came into effect for the Josephson and von Klitzing constants  $K_{J,90}$  and  $R_{K,90}$  to be used in practical representations of the volt and the ohm. The conventional values were adopted by the CIPM in October 1988 on the recommendation of its Comité Consultatif d'Électricité (CCE) and their implementation has led to a significant improvement in coherence and accuracy in electrical metrology throughout the world. I draw your attention here to draft Resolution B concerning the Josephson and quantum-Hall effects. In both of these fields the BIPM played an important role, first in the scientific discussions which led up to the decisions by the CIPM and second in the preparation of detailed technical documents required for their subsequent implementation. Once again this re-inforces the view of the Comité International that having a well-qualified and experienced scientific staff at the BIPM is a highly cost-effective way of coordinating and advancing world metrology.

During this same period the decisions of the CIPM and the 18th Conférence Générale relating to the takeover by the BIPM of responsibility for International Atomic Time (TAI) have been implemented. On 1 January 1988 the Bureau International de l'Heure formally ceased to exist. Its responsibility for observation of the rotation of the Earth passed to a new International Earth Rotation Service and that for TAI to the BIPM. By this time the BIPM had already established TAI and had taken over its diffusion, with that of UTC, following the move from the Paris Observatory to the Pavillon de Breteuil in 1985. What was unforeseen when the decisions of the CIPM and the 18th Conférence Générale were being prepared was the large increase in work load soon to accrue to the task of establishing the world's time scale due to the spectacular improvement in accuracy which resulted from the application of the Global Positioning System (GPS) to time transfer. This improvement in accuracy, of between one and two orders of magnitude, in our ability to compare clocks on a routine basis led the Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS) in 1989 to formulate a number of Recommendations. Some of these concerned time standards and time comparisons, and here I draw your attention to draft Resolution A, and others identified new tasks which the Comité requested the BIPM to undertake. Among these was the operation of some commercial atomic clocks at the BIPM to

enable practical experience to be maintained in the techniques of time transfer. This practical involvement was considered essential to a group charged with coordinating and evaluating the results of clock comparisons between the laboratories contributing to TAI. It was recommended, however, that the BIPM time station should not contribute to TAI so as to maintain a proper separation between the generation of the scale and the assessment of its performance. The request for an increase in budget of about 3 % to cover the cost of the establishment and long-term maintenance of the BIPM time station, detailed in the Convocation to this Conference, is based on the opinions expressed by the CCDS and by its Working Group on TAI. Progress in national laboratories and universities on novel frequency standards based on trapped or slow atoms or ions now holds out the prospect of frequency standards and clocks having accuracies considerably better than today's best standards. If such improved standards come to be realized not only will their comparison become a formidable technical challenge but the various corrections, which are now made without too much difficulty, will call for a deeper level of understanding of the theory of relativity and quantum mechanics. There is no doubt, however, that the ability to make even more precise time comparisons, and corresponding position measurements covering the whole surface of the globe, will be taken up for scientific and industrial purposes as were the possibilities presented by GPS. This highlights two of the characteristics of modern metrology: the first is that much work is at the frontiers of knowledge in physics and the second is that practical applications in advanced technology follow close behind. Today's advanced technology relies upon accurate measurement to an even greater extent than in the past. The organs of the Convention du Mètre must constantly strive to ensure that the underlying system of worldwide measurement can meet the practical requirements set by science and industry.

Time measurements, the newest of the BIPM's scientific activities, are developing rapidly, but there are also changes in the oldest, the measurement of mass and the conservation and diffusion of its unit the kilogram. At the 18th Conférence Générale the prospect of a general verification of national prototypes of the kilogram was envisaged. In Resolution 1 national laboratories were asked to prepare for the sending of their national prototypes to the BIPM. In 1989 the verification (the third since the distribution of prototypes at the 1st Conférence Générale in 1889) began with the comparison of the international prototype with its official copies and with the working standards at the BIPM. These comparisons (and all others in the third verification) were made using the NBS-2 balance, which now has a repeatability of about 1 µg. The results, which will be described in detail by the President of the Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM), showed that significant changes of mass take place in the months following washing and cleaning. These changes occur not only in the mass of the international prototype but in the mass of the other Pt-Ir prototypes as well. The consequences of this observation for the third verification were discussed by the CIPM and subsequently by a Working Group of the CCM. Some forty national prototypes were sent to the BIPM to participate in the verification and measurements on half of them have now been completed. This is a particularly important exercise since it coincides with significant improvements in balance performance both at the BIPM and among commercial developers. New work is under way at the BIPM and national laboratories with a view to understanding the processes that take place on the surfaces of mass standards and that lead to changes of mass. Much of this work was stimulated by the observation, made at the BIPM, of the changes that take place in the mass of the international prototype after cleaning.

The search for a practical means to define the unit of mass in terms of atomic and fundamental constants or a macroscopic quantum effect is not new. What is perhaps new is the possibility that such a definition may actually be achieved. A great deal of interest is now being shown in experiments that allow the accurate comparison of a gravitational force with an electromagnetic force. In principle such experiments could lead to a measurement of mass in terms of fundamental constants through the Josephson and quantum-Hall effects. Other experiments are being pursued in which the mass of a macroscopic single crystal of silicon is evaluated in terms of the number and mass of the individual atoms of silicon it contains. Although neither of these methods has yet reached the level at which serious consideration need be given to a change in definition of the unit of mass, the prospect of such a stage being reached in the foreseeable future is now a real one.

In addition to these activities which relate to base units of the SI the CIPM has, through its Comité Consultatif d'Électricité and its Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR), taken up new work in the field of fibre-optic metrology. The need to be able to measure the power entering and leaving a fibre-optic transmission line is now of importance in the electro-optic industries. Work in this new field will be reported by the President of the CCPR. I will return to some of the other activities of the Comités Consultatifs later on and the President of each Comité Consultatif will make his own Report during the Conférence.

The CIPM has also examined the possibility of taking some action related to metrology in chemistry and physical chemistry. At its meeting in September 1990 the Comité International established an *ad hoc* Working Group and charged it with making a preliminary study of the needs for traceability in these types of measurements and to give an opinion on whether or not the CIPM could usefully take action. The *ad hoc* Working Group met on 4 and 5 June 1991 at the National Institute of Standards and Technology (Washington) under its Chairman Dr J. Lyons and presented a report to the CIPM at its 1991 meeting. As a result the CIPM decided that the *ad hoc* Working Group should be called the *Working Group on Metrology in Chemistry* and that it should initiate some international comparisons among national laboratories, in collaboration with specialists from other competent laboratories and relevant international bodies. This programme of international comparisons will be limited to a few reference methods of wide application applied to a few key reference materials. The intention is to discover if such a limited programme can lead to improved traceability for a much wider range of methods and materials.

Important changes in the practice of metrology and the establishment of lines of traceability are taking place as a result of the increasing ease with which practical Josephson and quantum-Hall systems can be obtained. It is now not unknown for industrial companies to have their own representations of the volt and the ohm by means of these two macroscopic quantum effects. In such circumstances the traditional hierarchical chain extending from the national laboratory (or even from the BIPM) to the shop floor no longer exists. The role of the national laboratory and the BIPM, in consequence, differs in these fields from what it was in the past. Systems based on macroscopic quantum effects are much more stable and reproducible than any existing transfer standard. Comparisons that really test the systems can only be made by transporting complete Josephson or quantum-Hall systems. This has already been done for Josephson systems and results will soon be available for comparisons carried out by the BIPM at NIST, NPL, NRC and PTB. One result of this is that the

large-scale comparisons of Weston cells formerly carried out on a regular basis are no longer required and the similar comparisons of standard resistances are under review. The role of the BIPM in these fields has become that of maintaining Josephson and quantum-Hall systems as the basis of its calibration services and carrying out occasional direct comparisons of Josephson systems. It is likely that direct comparisons of quantum-Hall systems will take place in future years. It should not be forgotten that, although no one questions the stability or universality of  $2e/h$  or  $h/e^2$ , the practical realization of complete systems to produce 1 V, 10 V or 12 000  $\Omega$  is a task of considerable complexity and, without at least one independent check, cannot be considered reliable at the highest levels of accuracy.

This brings me to developments at the BIPM. At the time of the 18th Conférence Générale I informed you of progress in the construction of a new building destined to house a library and offices. This building, which we called the Nouveau Pavillon, was inaugurated at the time of the 77th meeting of the CIPM in October 1988 and since then has given entire satisfaction. I hope you will take the opportunity of visiting it on Tuesday afternoon when the laboratories and other facilities at the BIPM are open to delegates to the Conférence Générale. It has allowed the urgent need for a proper library to be met and has relieved the previously cramped office and secretarial space.

At the 17th Conférence Générale my predecessor as President of the Comité International laid out a plan for building at the BIPM which had been drawn up by the Comité International in 1980. Since then two building projects have been completed, the first opened in 1984 provides principally laboratory and office accommodation for the laser work of the length section and the second is, of course, the Nouveau Pavillon. This brings to a total of eight the number of buildings at the BIPM. These comprise the Pavillon de Breteuil itself, originally built in 1672 for Monsieur the brother of Louis XIV to the design of Gobert the King's architect, the Petit Pavillon dating from the early 18th century, the Observatoire erected in 1878 which was the first building of the Comité International, the Nouvel Observatoire which was an extension to the Observatoire completed in 1929, the two buildings erected in the early 1960s to house the then newly established Ionizing Radiation Section and finally the two buildings already mentioned erected in the 1980s.

Despite the great progress made over the past decade or so, not only through providing of the new buildings but also through improvements to existing buildings, there remains an urgent need to provide more space for the mechanical workshop. While the Comité International does not feel able at present to make proposals for any further new buildings, plans exist for concentrating the mechanical workshop on the ground floor of the main Ionizing Radiation building. Part of the mechanical workshop is already established there and it has been found possible to make further space by a more efficient use of other parts of the building.

In 1990 after the transfer of part of the book store to the new library a major refurbishment was carried out on one of the rooms of the Nouvel Observatoire and new laboratory space for the electricity section has been made. A major effort remains to be made in the modernization of the air-conditioning in some of the Observatoire laboratories. During the period 1993 to 1996 considerable financial resources will have to be assigned to this development, as it is an essential service for laboratories devoted to high level metrology.

The past few years have witnessed a significant reduction in the average age of the staff at the BIPM. This has resulted from the retirement of a number of people who had given long and devoted service, in some cases extending to fifty years, to the cause of metrology at the BIPM. The average age of the staff as a whole is now about 48 years and that of the professional scientific staff is also 48 years, having fallen from a maximum of 53 years reached in 1985. A further significant reduction in the average age of the scientific staff will take place over the four year period 1993 to 1996 as a result of retirements.

On 1 January 1991 ownership of the copyright of the journal *Metrologia* passed to the BIPM from its previous publisher Springer-Verlag. In 1965 when *Metrologia* first appeared, under the auspices of the CIPM, an agreement was reached with Springer-Verlag under which the tasks of publication were divided. From 1965 to 1980 the editorial work was carried out at the NRC (Ottawa) and from 1982 onwards at the BIPM but publication was left in the hands of Springer-Verlag. In 1989 the CIPM came to the conclusion that the future of *Metrologia* would be best assured if the publication as well as the editing of the journal was the responsibility of the BIPM. The transfer was agreed after negotiations between the Director of the BIPM and Springer-Verlag. I would here like to express my appreciation to the Directors of Springer-Verlag, first, for our twenty-five years of excellent cooperation and, second, for their constructive and helpful attitude at the time of the transfer of ownership.

The first number of the new *Metrologia*, which retains the original editorial policy with respect to the high quality of its scientific articles, was Volume 28, No 1, and appeared in February 1991. As you will see we are making efforts to widen the readership of our journal by bringing out occasional Conference Proceedings and Review numbers on special topics in addition to the four regular issues per year which include, from time to time, news from laboratories and other organizations. I urge all delegates to the Conférence Générale to take every opportunity to promote *Metrologia* as it is now, in every respect, our own journal.

In collaboration with OIML, ISO and IEC the BIPM has been working on the 2nd edition of the *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology* and on a new document, under the auspices of ISO, on the expression of uncertainties in measurement. This second document is of considerable importance since it addresses a problem common to all aspects and levels of metrology. It will be based on the principles adopted by the CIPM in 1980 and should lead to a worldwide harmonization of practices in this difficult and often contentious field.

I come now to the activities of the Comités Consultatifs. Since the last Conférence Générale there have been eight meetings of Comités Consultatifs: two meetings of the Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM) and one meeting of the Comité Consultatif d'Électricité (CCE), the Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS), the Comité Consultatif de Thermométrie (CCT), the Comité Consultatif des Unités (CCU), the Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR) and the Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants (CCEMRI). In addition the three sections of the CCEMRI each met twice, a joint Working Group of the CCE and CCPR met to study specific problems arising in the metrology of fibre optics, various Working Groups of the CCT met on a number of occasions to prepare the text of the ITS-90 and its two supporting documents and, finally, the Working Groups on mass, force and pressure of the CCM each met on one or two occasions.

Although the President of each Comité Consultatif will give his own detailed report on the activities of his Comité I shall make just a few remarks on each. The Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM) has not met since the adoption of the new definition of the metre in 1983 but a meeting has been arranged for 1992. The CCM at its meeting in May 1991 reviewed the progress of the third verification of national prototypes of the kilogram and received reports from its Working Groups on Force and Pressure and had a discussion on the experiments mentioned at the beginning of my Report which may one day lead to discussions on a new definition of the kilogram. The CCDS and its Working Group on TAI made important recommendations to the CIPM not only concerning work at the BIPM but also, stimulated by the recent improvement to the accuracy of time transfer resulting from the use of GPS, on more general aspects of time metrology. The CCPR has reviewed the progress made in absolute and spectro-radiometry and has initiated new international comparisons designed to test new methods. In addition to work on fibre-optics radiometry the CCPR has examined progress being made in radiometry using electron storage rings. An international comparison of cryogenic absolute radiometers is also envisaged. The work of the CCE and CCT has already been mentioned but I would like to draw your attention to the remarkably successful way in which both of these Comités Consultatifs made use of small *ad-hoc* Working Groups. Their members were leading specialists in their field known worldwide who were able to reach agreement on matters where, in some cases, strongly expressed and even opposing views were held at the outset. I have already remarked on the role of the BIPM in this matter, but now I must add my thanks to all those from national laboratories who so successfully contributed to the work. The Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants (CCEMRI) continues to work in the fields of radioactivity, X-rays and  $\gamma$ -rays and neutrons through its three Sections. Numerous international comparisons are organized some of which take place at the BIPM while others are carried out at national laboratories having facilities and resources not available at the BIPM. The most recent meetings of the CCEMRI and its three Sections were arranged all to take place at the BIPM within the same week and at the meeting of CCEMRI some independent experts were invited. The Comité Consultatif des Unités (CCU) at its meeting in 1990 adopted proposals, now before the Conférence Générale as draft Resolution D, for the extension of the list of SI prefixes. It also examined proposed modifications to the SI brochure consequent upon the introduction of the ITS-90 and the decisions of the CIPM regarding the Josephson and quantum-Hall effects. The 6th edition of the SI brochure incorporating these changes has now been published.

Coming now to the composition of the Comité International and news of Honorary Members of the Comité, it is with sadness that I inform you of the death of an Honorary Member, J. Stulla-Götz, who was a Member of the Comité from 1954 to 1977. He was a distinguished member of the Comité Consultatif pour la Définition du Mètre and of the Comité Consultatif des Unités. He thus took an important part in the discussions that led up to the creation of the Système International d'Unités. For a long time he was also President of the Comité International de Métrologie Légale and he must take much of the credit for establishing the excellent relations that exist between our two organizations.

During the four years since the last Conférence Générale there have been four resignations from the Comité International: those of Messrs. Ambler, Dean, Mekhannikov and Mitra. In recognition of the sterling service he gave to the Comité

and the dynamism of his Presidency of the CCEMRI and CCE, E. Ambler was elected an Honorary Member of the Comité.

These resignations led to the election by cooption of Messrs. P. B. Clapham, S. K. Joshi, J. W. Lyons and V. I. Poustovoit. In conformity with Article 8(1921) of the Rules Annexed to the Convention du Mètre these provisional elections are now submitted for ratification by this Conférence Générale. The names of five other members of the CIPM, drawn by lot, bring to nine the total number of members whose election or re-election is now before the Conférence Générale.

In October 1989 Jan de Boer informed the Comité International that he wished to lay down the heavy responsibility of the secretaryship of the Comité, a task he had borne since 1962. In the intervening 27 years he had assumed the secretaryship of six Conférences Générales, had overseen great changes in the BIPM and been a pillar of support and wise advice to three Directors of the BIPM. The Comité in accepting his resignation paid tribute to the great distinction with which he had carried out these tasks and in particular thanked him in the name of the Member Nations of the Convention du Mètre.

I come now to the Report that the Director of the BIPM has prepared on the work carried out in the laboratories of the BIPM since the 18th Conférence Générale, that is, since October 1987.

#### *Length*

*Lasers.* — In the four-year period since the 18th Conférence Générale the number of international comparisons of laser frequencies carried out at or in cooperation with the BIPM is significantly higher than during the previous four year period. In part this reflects the growing need for demonstrable international traceability in measurement but it also results from the larger number of Member States of the Convention du Mètre now basing their national length standards on stabilized lasers. While many of these comparisons have taken place at the BIPM, namely those with Belgium, France, Hungary, Republic of Korea, Poland, South Africa, Sweden and Yugoslavia, others have taken place elsewhere and have been organized so that several member countries in a region can jointly compare their lasers with those of the BIPM. Such comparisons have taken place in Bratislava (Czechoslovakia) with the participation of Czechoslovakia, the then German Democratic Republic, Hungary and the USSR, in Borås (Sweden) with the participation of Denmark, Finland, Germany and Sweden all using He-Ne lasers stabilized on iodine at a wavelength of  $\lambda = 633 \text{ nm}$ , in Ottawa (Canada) with the participation of Canada and the USSR and in Braunschweig (Germany) with the participation of Germany and the USSR, these last two comparisons being made with He-Ne stabilized on methane at wavelength of  $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ . A comparison also took place in Tsukuba (Japan) with Japan on the occasion of the 1988 Conference on Precision Electromagnetic Measurements using lasers stabilized at  $\lambda = 633 \text{ nm}$  and  $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ . The provision of iodine cells to national laboratories continues. A total of 77 cells have been filled and checked at the BIPM since the last Conférence Générale. The supply of laser tubes studied by the BIPM and suitable for metrological purposes is coordinated through bulk orders placed by the BIPM on behalf of national laboratories with the Japanese firm NEC. Since the last Conférence Générale more than a hundred laser tubes have been ordered on behalf of some twenty five member nations of the Convention du Mètre. One of the critical factor affecting the frequency of an iodine stabilized laser is the

quality of the iodine cell. A comparison of iodine cells has been carried out at the BIPM among cells supplied by member laboratories of the CCDM. A total of 35 cells was measured from the national laboratories of Australia, Canada, People's Rep. of China, France, Germany, Italy, Japan, Republic of Korea, United Kingdom and the USA. An important result of this comparison was the establishment of an empirical relation between the frequency offset measured when the cells were incorporated in BIPM lasers and the impurity level measured by fluorescence at a wavelength of 502 nm. Studies have also taken place of He-Ne lasers stabilized to transitions of the iodine molecule at  $\lambda = 543$  nm and 612 nm using cells both internal and external to the laser cavity and to a transition of the methane molecule at  $\lambda = 3.39$   $\mu\text{m}$  using an internal methane cell. Experience with methane stabilized lasers has shown that it is possible to maintain frequency stability over a period of several years to within about 1 kHz, or 1 part in  $10^{11}$  of its value. The comparisons made in Canada and Germany, referred to earlier, enabled us to show that the measurements of the absolute value of the frequency of the methane transition made in Canada, France, Germany and USSR (based on an earlier comparison in 1986) are in good agreement. Studies have begun of the metrological properties of diode lasers stabilized at a wavelength of  $\lambda = 850$  nm by saturated absorption of caesium.

*Line scales and end gauges.* Since the decision in 1985 to cease the calibration of end gauges using the Tsugami interferometer only those gauges of length between about 500 mm and 1 000 mm have been accepted for calibration using the interferometer comparator. Such calibrations have been done over the past four years only for Romania. One-metre line scales have been calibrated using the interferometer comparator for Hungary, Republic of Korea, Nigeria, Poland and the USSR.

### *Mass*

*Mass standards.* — The third periodic verification of national prototypes of the kilogram was begun in 1989 and should be completed by the end of 1992. Nearly forty national prototypes of the kilogram i.e. those made of Pt-Ir, are participating in the verification and at the time of writing this report twenty have been verified. The work began with the comparison of the international prototype with its official copies and the working standards of the BIPM. During these preliminary comparisons a study was carried out of increases in mass observed after cleaning and washing of the international prototype, one of its official copies and two other Pt-Ir standards. These increases amounted to about 1  $\mu\text{g}$  per month over a period of about four months and led the Comité International to decide that for the purposes of the third verification the mass of the international prototype should be taken as its mass just after cleaning and washing by the BIPM procedure and that this mass should be deduced by extrapolation. The same procedure is being used for national prototypes. Stimulated by the observation of these changes in mass following cleaning and washing a study is now under way at the BIPM of the effects of ambient conditions of humidity, pressure and temperature on the mass of Pt-Ir 1 kg standards. The study is being carried out using the BIPM flexure-strip balance, which has a repeatability below 0,1  $\mu\text{g}$ , and two diamond-machined Pt-Ir standards one of which has twice the surface area of the other. Measurements of the effect of variations in ambient humidity have been completed and show an effect ten times smaller than those reported previously. Since the last Conférence Générale most effort on mass standards has been concentrated on the third periodic verification and work associated with it. Stainless-steel kilograms have been calibrated only for Belgium, Hungary, Norway

and Switzerland. The provision of Pt-Ir prototype standards finished by diamond machining continues and since the 18th Conférence Générale new prototypes have been supplied to Canada, Germany, Hong-Kong, Israel, Republic of Korea and Portugal.

*Balances.* — The NBS-2 single-pan knife-edge balance has, since soon after its installation at the BIPM in 1970, been the BIPM's principal balance for the comparison of 1 kg mass standards. It is now equipped with an optical-interferometer read-out allowing the magnitude of the oscillations of the beam to be entered directly into a desk-top computer with which subsequent calculations of mass differences are made. This has very much reduced the labour of using the balance and has led to an improvement in the repeatability of the measurements. This is now regularly below 1  $\mu\text{g}$  in the comparison of up to six 1 kg standards. It is the NBS-2 that is being used for the third verification of national prototypes. The previous principal balance of the BIPM, the Rueprecht 1 kg balance, as well as the 50 g and 20 g Rueprecht balances have been equipped with diode-array read-outs of beam oscillations. As with the NBS-2, the beam oscillations are measured and entered directly into desk-top computers. The use of the BIPM prototype flexure-strip balance has already been noted in the study of surface effects on Pt-Ir 1 kg standards. A second version of the flexure-strip balance is now under construction which will allow the comparison of up to eight 1 kg standards (only two can be compared in the prototype version). Both flexure-strip balances are mounted in sealed chambers that can be evacuated. The prototype flexure-strip balance has been used in experiments to search for the so-called '5th Force' and for anomalous mass changes reported in spinning gyroscopes. Null results were obtained in both of these experiments but they demonstrated the usefulness of a very precise balance in the investigation of some fundamental laws of physics. The fully-automated Mettler balance (Type HK 1000 MC), purchased in 1987, has also been installed in a sealed chamber and after completion of various improvements, notably in respect of the mass changer, now gives full satisfaction.

*Gravimetry.* — The third international comparison of absolute gravimeters took place at the BIPM, under the auspices of the International Association for Geodesy, in November and December 1989. Absolute gravimeters from Austria, Canada, People's Rep. of China, Finland, Germany, Italy, Japan, USA, USSR and the BIPM participated. In addition, relative gravimeters from seven institutions made relative measurements between the various stations at the BIPM. During the comparison the frequency of the laser in each gravimeter was measured, *in situ*, by comparison with a BIPM He-Ne iodine-stabilized laser. It was concluded that in some gravimeters the accuracy of the measurements of  $g$  was limited by the accuracy of the wavelength stabilization of the laser. The overall results are considered satisfactory and a further international comparison is planned within the next four years.

### *Time*

Since March 1985 TAI and UTC have regularly been established and distributed by the BIPM. Following the approval of the 18th Conférence Générale of the transfer to the BIPM of the Time Section of the BIH at the Paris Observatory and subsequent decisions of the international unions concerned, the BIH formally ceased to exist on 1 January 1988. That part of the work of the BIH concerned with Earth rotation was passed to a new International Earth Rotation Service and the Time service was formally taken over by the BIPM. The establishment of TAI is carried out on the

basis of clock comparison data from about 200 clocks in some 50 institutions distributed over the five continents. The algorithm used to establish the scale is designed to maintain the best possible long-term stability. This algorithm is continually being reviewed and compared with other algorithms in use in national laboratories. One of the basic assumptions underlying TAI is the assumed independence of the contributing clocks. At the request of the CCDS we have tested this independence by a study of correlations among clock data. These correlations may sometimes be trivial in origin but it is now clear that significant correlations arise from the similar response of clocks to changes in their environment, principally the local ambient humidity, which varies with the seasons of the year. The great majority of the time comparisons are made using the satellites of the US Global Positioning System (GPS) which are observed simultaneously from different sites. The programme of GPS satellite tracking for laboratories contributing to TAI is now established on a regular basis by the BIPM. The use of GPS has resulted in a great improvement in the accuracy of time transfer, which now approaches 10 ns. To take advantage of this greater accuracy much more care is now necessary in the preparation and treatment of the data and in the application of the corrections. Error in the relative coordinates of some of the GPS antennas was shown to significantly degrade the quality of the time transfer. As a result of work at the BIPM which elucidated these errors, coordinate corrections were obtained and issued by the BIPM for 12 laboratories in Europe, 4 in North America, 1 in the Middle East and 6 in the Far East. Work has been carried out on the measurement of ionospheric delays and their use to correct GPS data. They were first measured on a regular basis using a two-frequency codeless receiver built at the BIPM by a Japanese Guest Worker. For the first time in June 1990 the BIPM *Circular T*, used to distribute TAI and UTC, included data on UTC — GLONASS time; GLONASS is the USSR equivalent of GPS and is now used to link UTC(SU) with UTC. The BIPM is participating in discussions within a Working Group of the International Astronomical Union on Reference Systems whose aim is to give coherent definitions of space-time coordinates in a relativistic theory. The present accuracy of time comparisons requires relativistic corrections and although these are still straightforward, further improvements in accuracy will require more complex corrections to be made. Millisecond pulsars appear to show stabilities of periods that rival atomic clocks. It seems, however, that pulsars alone cannot generate a uniform time scale as observed on Earth because they have a frequency drift whose value is not known. Nevertheless it may be possible to use pulsar data in the evaluation of the long-term stability of TAI when more years of data become available and we are studying this possibility. A commercial caesium clock, on loan from the US Naval Observatory, was installed at the BIPM in 1990 and the BIPM GPS receiver has been moved from the Paris Observatory to the BIPM. This is the beginning of the establishment of a group of commercial clocks and associated equipment to allow the BIPM, as requested by the CCDS, to take part in time transfer experiments and thus maintain expertise in this important aspect of time scale work.

### *Electricity*

On 1 January 1990 the new reference standards for electrical potential and resistance based upon the Josephson and quantum-Hall effects were implemented at the BIPM as in practically every other standard laboratories throughout the world. The BIPM played an important part in the work of the CCE in arriving at an agreed formulation and giving guidance in the implementation of the recommendations adopted by the CIPM in relation to these new reference standards.

*Resistance.* - As a preparation for the CCE's work and in order to compare the results of quantized Hall resistance measurements, the BIPM in 1987 carried out a comparison of  $1\ \Omega$  resistance standards, from the national laboratories of Australia, Canada, People's Rep. of China, France, Federal Republic of Germany, Japan, Netherlands, Switzerland, United Kingdom, USA and USSR. After the new recommendations went into effect, to check the reproducibility of the new reference standard of resistance based upon the quantum-Hall effect, the BIPM organized at the request of the CCE, another international comparison, this time of  $1\ \Omega$  and  $10\ \text{k}\Omega$  resistance standards among those national laboratories whose standards were based on the quantum-Hall effect. This comparison took place in 1990 and included resistance standards sent to the BIPM from the national laboratories of Australia, Austria, Canada, People's Rep. of China, Finland, France, Federal Republic of Germany, the then German Democratic Republic, Italy, Japan, the Netherlands, Norway, Portugal, Sweden, Switzerland, the United Kingdom, USA and USSR. The results are considered to be reasonably good with agreement at the level of a few parts in  $10^8$  for a majority of the laboratories claiming uncertainties at this level. The accuracy of the results still appears to be limited by the stability of the travelling standards the best of which are now found among the  $10\ \text{k}\Omega$  standards. At the BIPM the system for realizing a quantized-Hall resistance standard has been much improved over the past four years by the development of a cryogenic current comparator using a novel SQUID null detector acting as a nanovoltmeter. Also a new method of measuring the quantized-Hall resistance has been developed using a cryogenic current comparator driven by low frequency a.c. rather than d.c. thus bringing to the measurement all the advantages of a.c. techniques. The need to provide samples for quantum-Hall effect studies led the BIPM, in collaboration with EUROMET, to place a bulk order for quantum-Hall samples with the Laboratoires d'Électronique Philips. The BIPM is now making these samples, all of which seem to be satisfactory, available to national laboratories.

*Electrical potential.* - The development of  $1\ \text{V}$  and  $10\ \text{V}$  arrays of Josephson junctions has considerably advanced the technology of the Josephson effect for metrology. At the BIPM two  $1\ \text{V}$  arrays are now in operation and comparisons between them show agreement at the level of tenths of nanovolts. This has been demonstrated by direct comparisons and also using a novel transfer standard that allows accurate comparisons either between Josephson arrays or between a Josephson array and a Weston cell. Using one of the  $1\ \text{V}$  arrays as a travelling standard the PTB and BIPM standards were compared at the PTB and agreement found to within a few tenths of a nanovolt. Similar agreements were found between the BIPM array and those brought to the BIPM from the Danish national laboratory and from the LCIE. Arrangements have been made to take the BIPM travelling Josephson standard to the NIST in Washington and the NRC in Ottawa before the end of 1991. A  $1\ \text{V}$  to  $10\ \text{V}$  comparator made at the BIPM is now in service for the routine calibration of  $10\ \text{V}$  Zener diode standards.

*High- $T_c$  superconductors for metrology.* - Studies have been made of the application of certain high- $T_c$  superconductors in the establishment of Josephson reference standards. Soon after their discovery was announced it was shown at the BIPM that the ratio of the frequency to voltage of Josephson junctions made from this new material agreed with that from a metallic junction to within a few parts in  $10^6$  and improvements in these measurements are being prepared. Studies are also under way on the application of these materials as electromagnetic shields in some critical metrological applications.

*Calibrations.* It is in the field of electricity that the largest number of calibrations are carried out for national laboratories. Since the last Conférence Générale 100 certificates have been issued for the calibrations of resistance standards, Weston cells or Zener diodes for the national laboratories of Austria, Belgium, Brazil, Bulgaria, People's Rep. of China, Czechoslovakia, Egypt, Finland, German Democratic Republic, Hungary, Ireland, Israel, Italy, Democratic People's Republic of Korea, Republic of Korea, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Roumania, South Africa, Sweden, Switzerland, the United Kingdom, the USSR and Yugoslavia.

#### *Radiometry and photometry*

Since the 18th Conférence Générale a new laboratory for radiometry has been established. Preparations are now well advanced for an international comparison of spectral responsivity of silicon photodiodes, initiated by the CCPR at its meeting in 1990 to take place at the BIPM. The BIPM laboratory is now fully equipped to carry out this comparison and has already gained experience in the behaviour of silicon photodiodes for radiometry. Experimental and theoretical work has been carried out on the self-calibration technique and on the effects of changes in surface films brought about by cleaning or by changes in ambient humidity. In all the new work on radiometry, equipment has been designed from the outset to be fully automated so that measurements are always carried out under computer control. The advantages of so doing have been evident in the reproducibility and coherence of the results obtained. Work in photometry at BIPM has been at a fairly low level in recent years since the attention of the CCPR has been directed much more towards radiometry. Lamps continue to be calibrated as standards of luminous intensity and luminous flux, values being based on the adjusted values of the standards that resulted from the 1985 international comparison. The BIPM, in collaboration with the NPL (UK) and the INM (France), carried out a supplementary study in an attempt, in the end unsuccessful, to resolve some inconsistencies in the results of this comparison. Since the 18th Conférence Générale lamps have been calibrated for Bulgaria, Poland, Romania, Sweden, the USSR and Yugoslavia. The BIPM is leading a CCPR Working Group in an attempt to assure the future provision of lamps suitable for use as standards of luminous intensity and luminous flux. Contact has been made with a number of manufacturers.

#### *Thermometry and pressure measurement*

Following the decision of the CIPM in 1985 to concentrate effort on radiometry at the expense of thermometry, no new work has been undertaken and calibration for national laboratories has ceased. Nevertheless, expertise has been maintained in the important room-temperature range necessary for other work at the BIPM. The ITS-90 has been realized in the range from 0 °C to 30 °C and studies continue on the long-term stability of triple-point-of-water cells and on the effects of immersion for platinum resistance thermometers in triple-point-of-water and gallium cells. The measurement of pressure to high accuracy remains an important requirement for the calculation of buoyancy effects in mass metrology. The BIPM interference monobarmeter is thus maintained in operation and preparations are being made for it to be reconditioned by a French company.

*Ionizing radiations*

*Dosimetry.* — In the field of X-ray and  $\gamma$ -ray, dosimetry research continues with the aim of improving the measurement of absorbed dose to water and, as an intermediary, to graphite. This work, which is both experimental and theoretical, required the characterization of the new  $^{60}\text{Co}$  source installed in 1987. The energy spectrum of this source, which has an activity of 176 TBq, has been obtained by calculations subsequently confirmed by measurements of the transmission of the beam through a water filter. The methods used to obtain the absorbed dose to water were ionometry, which gives absorbed dose directly, and the so-called scaling-theorem method, which is based on an ionometric measurement of the absorbed dose to graphite. The results of the two methods were in good agreement. A third method of obtaining absorbed dose to water now being set up at the BIPM, is through the use of a water calorimeter. The measurement of air kerma is now made using the new  $^{60}\text{Co}$  source and the results were found to be in good agreement with those previously obtained using the old, much weaker, source. Comparisons of standards of absorbed dose, air kerma or exposure have been made with those from Australia, Canada, Germany, Hungary, Switzerland, United Kingdom and the USA and calibrations have been carried out for laboratories of Brazil, Denmark, Norway, Poland, Spain, United Kingdom, Yugoslavia and the International Atomic Energy Agency (Vienna). In the field of neutron dosimetry, work has begun to determine the spectra of neutrons in the BIPM neutron fields using a liquid scintillation detector equipped with a pulse shape discriminator. The international comparison on neutron dosimetry organized by the BIPM was completed in 1988. Laboratories from the People's Rep. of China, Germany, Japan, Netherlands, United Kingdom and the USA participated. The results were generally good but differences found in the case of two laboratories were valuable in identifying previously unsuspected errors in technique. A number of neutron detectors have been calibrated for laboratories in France.

*Radionuclides.* — An international comparison of measurements of the activity of  $^{125}\text{I}$  has been carried out with laboratories from Belgium, Brazil, Canada, People's Rep. of China, Czechoslovakia, France, Germany, Hungary, Indonesia, Italy, Japan, Republic of Korea, Poland, South Africa, United Kingdom, USA and USSR. The total range of the results was 7%. A trial comparison of  $^{75}\text{Se}$  took place in 1989 among laboratories from Canada, France, Hungary and Germany. The results are considered sufficiently good to justify the full scale comparison now being organized by the BIPM. The International Reference System for measuring the activity of  $\gamma$ -ray emitting radionuclides, known as SIR, is being extended to include radionuclides that cannot be measured with an ionization chamber. This is being done by using a liquid scintillation system which is now in operation and will allow the SIR to be extended to include  $\beta$ -particle and  $\alpha$ -particle emitting radionuclides. To gain experience with the new system the BIPM is participating in an international comparison of  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  and  $^{99}\text{Tc}$  being organized by the NIST (Washington). The accurate measurement of the activity of radionuclides requires a good understanding of counting statistics. Over many years work has been carried out at the BIPM on the fundamental aspects of this subject and progress continues to be made. In particular, the properties of a series of dead times have been examined in terms of a single generalized dead time, a novel method of modulo-2 correlation counting has been developed as also has the so-called parity method which allows the count rate of time coincidences between  $\beta$  and  $\gamma$  pulses to be obtained. In addition studies of particular features of the Poisson distribution have been made.

## Publications

Since October 1987 the following have been published :

- 18th Conférence Générale des Poids et Mesures (1987), Comptes Rendus*, 108 pages.
- Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures*, T. **55** (76th meeting, October 1987), 178 pages, T. **56** (77th meeting, October 1988), 148 pages, T. **57** (78th meeting, September 1989), 208 pages, T. **58** (79th meeting, September 1990), 159 pages.
- Comité Consultatif d'Électricité*, 17th meeting (1986), 189 pages, 18th meeting (1988), 168 pages.
- Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie*, 12th meeting (1990), 47 pages.
- Comité Consultatif de Thermométrie*, 16th meeting (1987), 162 pages, 17th meeting (1989), 79 pages.
- Comité Consultatif des Unités*, 10th meeting (1990), 54 pages.
- Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde*, 11th meeting (1989), 70 pages.
- Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants*, Sections I, II, III (1988), 136 pages.
- Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées*, 3rd meeting (1988), 70 pages.
- Annual Report of the BIPM Time Section*, vol. **1**, 1988, 136 pages, vol. **2**, 1989, 130 pages, vol. **3**, 1990, 131 pages.
- Circular D* (contribution of the BIPM on time scales) (monthly), 4 pages.
- Circular T* (monthly), 4 pages.
- Recueil de travaux du BIPM*, vol. **11** (1987-1988).
- Le BIPM et la Convention du Mètre*, 1987, 47 pages (second printing).
- The Pavillon de Breteuil*, 1991, 20 pages.
- Techniques for Approximating the International Temperature Scale of 1990*, July 1990, 205 pages.
- Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990*, December 1990, 177 pages.
- Système international d'unités (SI)*, 6th edition (1991), 118 pages.
- The calibration of standards and instruments at the BIPM* (1991), 24 pages.

To these publications must be added 44 BIPM Reports, about 120 articles in scientific journals or Proceedings of Conferences and *Metrologia*, the International Journal of Pure and Applied Metrology, which, starting from Volume 28 (1991), has been published as well as edited at the BIPM.

Since the latest Conférence Générale the then Director of the BIPM, Dr P. Giacomo has retired after twenty-two years of devoted service to the BIPM, ten as Deputy Director and ten as Director. He was succeeded on 1st August 1988 by Dr T. J. Quinn who was previously Deputy Director. Shortly after his retirement Dr Giacomo was presented with the insignia of the Légion d'Honneur by Monsieur Curien, Ministre de la Recherche et de la Technologie de France, at a ceremony that took place at the BIPM, in recognition of his long and distinguished career in the service of scientific research and especially metrology. I am pleased to take this occasion to offer him the thanks of the Comité International in the name of the Member Nations of the Convention du Mètre.

Prof. MARÉCHAL thanked the President of the Comité International for the quality of his report on the work accomplished or in course at the BIPM since the last Conférence Générale. He asked for comments from the floor. As there were no speakers, he proposed that the meeting proceed immediately to the formation of the Working Group responsible for preparing the discussion on the BIPM dotation for the four years 1993-1996, which would normally come under item 16 of the agenda.

Prof. KOVALEVSKY pointed out that the choice of member states called upon to take part in the work of this *ad hoc* Working Group takes into account the size of their percentage contribution and provides a certain geographical balance. After a few brief remarks, the group was established as follows : Germany, United States of America, Canada, China (People's Rep. of), Denmark, Spain, France, Japan, Mexico, United Kingdom, Czechoslovakia and the USSR.

Proposed by Prof. KOVALEVSKY, Dr PRESTON-THOMAS, Vice-President of the Comité International, was appointed President of this *ad hoc* Working Group, and it was made clear that, in this capacity, Dr Preston-Thomas would not act as a representative of his country.

It was agreed that the Working Group would meet on Tuesday 1 October at 10 h 30.

The session closed at 12 h 20.

---



---

SECOND SESSION  
OF THE 19th CONFÉRENCE GÉNÉRALE  
DES POIDS ET MESURES

Monday 30 September 1991, 15 h

---

The next items on the agenda were the presentation of a report by the President of each Comité Consultatif on the problems encountered by these committees since the last Conférence Générale. It should be noted that they were set up to assist the CIPM to take decisions in specific fields. A bilingual (French/English) version of the full text of the reports had been distributed to the delegations at the beginning of the meeting.

**7. Length and the definition of the metre**

Prof. D. KIND, President of the Comité Consultatif pour la Définition du Mètre, was asked to present his report.

In October 1987, during the 18th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), I ended my report with the announcement that the Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM) would meet in 1989. In the event the meeting will not now take place until 1992. We can conclude that the 17th CGPM (1983) in adopting a new definition of the metre based on a fixed value for the speed of light, and the Comité International des Poids et Mesures (CIPM), in providing a « mise en pratique » for the realization of this new definition, carried out an excellent job as no meeting of the CCDM has been necessary since 1982.

However, before recalling recent progress in the fields of absolute frequency measurements and international comparisons of stabilized lasers, as well as in the evolution of techniques, I would like to draw attention to the following. It was only possible to modify the definition of the metre in 1983 thanks to the first absolute determination of the frequency of a He-Ne laser stabilized on a transition of the methane molecule at  $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ . This was carried out at the National Institute of Standards and Technology (United States of America) in 1972, almost twenty years ago. At about the same time, various national laboratories and the BIPM measured the wavelength in vacuum of this same laser, thus obtaining a very precise determination of the value of the speed of light in vacuum. More recently, new determinations of the absolute frequency of this methane-stabilized laser have been carried out with reproducibilities of about one part in  $10^{11}$ . Taken together, these measurements show

a mean difference of 8 parts in  $10^{11}$  with respect to the value adopted in 1983, a difference which I mentioned in my report to the last Conference. In addition, travelling lasers of this type (from the VNIIFTRI [USSR] and from the BIPM) have shown that the absolute values obtained by the frequency chains of various national laboratories do not among themselves show systematic frequency differences greater than a few parts in  $10^{11}$ .

It is appropriate to emphasise here that, since 1983, a large number of countries have equipped themselves with lasers stabilized on radiations recommended by the CIPM for the practical realization of the definition of the metre, basically the He-Ne laser stabilized on the saturated absorption of iodine at  $\lambda = 633$  nm. In the last five years some twenty comparisons, by beat frequency, of lasers have been carried out, and in most of these the BIPM has played a central role. These comparisons have allowed the identification of certain parameters which limit the reproducibility of laser frequencies and so allow reduction of the dispersion of the results through closer control of the values of these parameters.

As large frequency shifts can be caused by the presence of impurities in the absorption cells, principally the iodine cells, the BIPM in agreement of the member laboratories of the CCDM, organized a comparison of iodine cells. Over forty cells have been studied. The provisional results show a frequency agreement between most cells of the order of  $\pm 2$  parts in  $10^{11}$ .

Recent results obtained from new molecular or atomic transitions, such as those of molecular iodine used to stabilize an He-Ne laser at  $\lambda = 544$  nm, calcium used in a beam of calcium atoms to stabilize a dye laser at  $\lambda = 657$  nm, and osmium tetroxide used to stabilize a  $\text{CO}_2$  laser at  $\lambda = 10,6$   $\mu\text{m}$ , indicate that the present list of six recommended radiations should be extended in the near future. Encouraging results have also been obtained with diode lasers which now emit radiation at visible wavelengths. New stabilizing techniques, for example heterodyne spectroscopy, should considerably improve the stability as well as the reproducibility of laser frequencies. Several national laboratories are about to carry out absolute frequency measurements using visible radiation. This should allow the values attributed to recommended radiations to be refined and the uncertainty to be reduced by at least one order of magnitude. Finally, spectacular results have been obtained in the field of trapped ions and on the cooling of atomic and molecular beams.

In the field of line scales and end-gauge standards, most national laboratories are now capable of linking their standards to the recommended wavelengths.

The sixth CCDM, in 1979, decided to organize a comparison of angle standards, with the National Research Laboratory of Japan (NRLM) acting as pilot laboratory. This took the form of a circular comparison between the member laboratories of the CCDM using two polygonal mirrors. The comparison was completed in 1987, but definitive results were not available for the 18th CGPM in October 1987.

In 1992, the CCDM will be taking all these new results into account. In particular it is likely to propose to the CIPM a revision of the «mise en pratique de la définition du mètre» through a readjustment of the values attributed to certain of the recommended radiations as well as to the parameters affecting frequency.

As the CCDM had not met since 1982, the report elicited no questions or comments and the President moved to the next item on the agenda.

## 8. Mass and related quantities

Prof. BRAY, President of the Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées, read his report.

Two meetings of the Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM) have taken place since the 18th CGPM, one in 1988 and one in 1991, the latter being the fourth since the CCM was created in 1981.

In 1985, before the second meeting of CCM, the committee had nine Working Groups, but these have now been reduced to six. At the 1988 meeting it was decided to merge WG2 (Air Density) and WG5 (Density of liquids and solids) into a single WG named «Density» and to merge WG3 (Maintenance of mass standards) and WG4 (Mass standards of stainless steel) to form one WG named «Mass standards». During the same 1988 meeting the CCM, having considered the importance of the work in progress in the balance sector, decided to establish an informal «Balance Club», open to everyone interested in the subject, with the aim of exchanging experiences gained in the design and the construction of precision balances. Finally, at its 4th meeting in 1991 the CCM decided to set up a «Low pressures» WG by merging the previously separate WGs on «Low pressures» and «Very low pressures». Consequently, the present six CCM WGs cover the following sectors: mass standards, density, force, high pressures, medium pressures and low pressures.

### *Third periodic verification of national prototypes of the kilogram*

The third periodic verification of national prototypes of the kilogram began in September 1988 and is still in progress. Thirty-five national prototypes have been sent to the BIPM. I recall that the first two verifications were carried out from 1899 to 1911 and from 1946 to 1953.

The third periodic verification of national prototypes of the kilogram consists of two parts: 1) comparison of the international prototype of the kilogram with its official copies and with BIPM prototypes and 2) comparison of the national prototypes with two of the official copies.

Before the first part of the third periodic verification of national prototypes of the kilogram, a study was made of the changes in the mass of the international prototype, one of its official copies and two diamond-machined platinum-iridium prototypes after cleaning and washing using the BIPM procedure. The results of this study and of the comparison of the international prototype with its official copies and a number of BIPM prototypes were presented to the CIPM in 1989 and later to an *ad hoc* meeting of the «Mass standards» Working Group of the CCM. On the basis of these results the CIPM decided that, for the purposes of the third verification, the mass of the international prototype should be taken as its mass just after cleaning and washing using the BIPM procedure and that this mass should be obtained by extrapolation. The CIPM made it clear that this did not in any way constitute a redefinition of the kilogram.

It was decided that, in the second part of the third periodic verification of national prototypes of the kilogram, the national prototypes would be compared in the as-received condition with two BIPM Pt-Ir standards. They were then subjected to the BIPM cleaning and washing procedure. After that the national prototypes were compared with two official copies of the international prototype, which had also previously been cleaned and washed.

The preliminary results concerning the first twenty of the national prototypes participating in the verification are now available. The following preliminary indications can be given :

1) The mass change, occurring during the years following cleaning-washing observed for the international prototype, its six official copies, and the twenty national prototypes so far examined, amounts to about  $1\ \mu\text{g}$  per year and the results confirm those obtained over the past twenty years.

2) The official copies of the international prototype and the first twenty national prototypes, when compared with the international prototype, show a mass increase, on average, of about  $30\ \mu\text{g}$  since 1889.

While waiting for the data from all thirty-five of the national prototypes to become available, national laboratories are reminded of the recommendation in Resolution 2 of the 18th CGPM that they should continue to investigate the composition and surface behaviour of Pt-Ir and other alloys. In view of the current uncertainty in our knowledge of the long-term drift in the mass of the international prototype and its national copies, and the need for a reference whose long-term stability is assured, national laboratories are encouraged to continue work on experiments aimed at providing a practical link, at the level of one part in  $10^8$  between macroscopic mass standards and atomic or quantum phenomena.

#### *Mass standards*

##### *Cleaning and other surface effects*

In connection with the procedure for cleaning and washing Pt-Ir standards, other techniques have been tested and are being studied. They are based on : (a) long-duration, non-pressurised steam washing, (b) ultrasonic cleaning with solvents, (c) modified Soxhlet cleaning with solvent, and (d) ultrasonic washing with solvents. Other investigations are in progress, with a view to : (a) determining mass variations connected with the surface and related to environmental parameters, in particular to humidity and (b) characterizing diamond-machined specimens.

Certain types of stainless steel have been investigated to determine their resistance to corrosion, long-term surface ageing and the degree of effectiveness of washing by steam plus surfactant solution.

##### *International comparisons of secondary standards*

A questionnaire concerning secondary-standard and reference-standard kilograms was circulated to member laboratories of the Working Group « Mass standards » of the CCM. The questions and the summary of the replies obtained from nine of the ten laboratories contacted, were ;

1. Accuracy of standards : accuracies range from  $11\ \mu\text{g}$  to  $22\ \mu\text{g}$  for nearly all the secondary standards, and from  $13\ \mu\text{g}$  to  $75\ \mu\text{g}$  for reference standards.

2. Material of standards : most standards are of stainless steel, but standards of alacrite XSII and nimonic 105 also exist.

3. Cleaning of standards : cleaning procedures differ and may involve, for instance, simply using a soft brush or degreasing with alcohol vapour.

4. Density of standards : for all the standards in question, the density is determined directly by hydrostatic weighing with a relative uncertainty of  $1 \times 10^{-6}$  to  $2 \times 10^{-5}$ .

5. Buoyancy of standards: all laboratories that calculate the buoyancy correction from measured ambient air parameters use the formula for doing so recommended by the CIPM. The stated relative measurement uncertainty ranges from  $1 \times 10^{-4}$  to  $3 \times 10^{-4}$  but in some laboratories buoyancy is directly determined with a relative uncertainty of about  $5 \times 10^{-5}$ .

6. Balances: accuracy lies between 1  $\mu\text{g}$  and 30  $\mu\text{g}$ .

7. The comparison itself: all laboratories consider the comparison useful and wish to participate. The comparison is planned to begin at the end of 1993.

#### *Diverse topics*

A study has been made with a view to identifying sources of weighing errors caused by magnetic interactions; the report includes information on the magnetic properties of the materials used for the construction of balances and mass standards. An instrument was constructed to measure the magnetic susceptibility of stainless-steel masses in the 1 kg to 10 kg range, within an interval between  $\chi = 0,001$  and  $\chi = 0,01$ .

#### *Density*

In connection with the determination of the density of solid standards, an interlaboratory comparison has been completed and the relevant final report was published (*Metrologia*, 1990, **27**, 139-144).

For the determination of water density a Task Group, including the BIPM, was constituted, to develop a formula based on modern data. Two national laboratories cooperate in this work which is being carried out using standard mean de-aerated ocean water (SMOW) and a spherical volume standard. The final report on this work is now being prepared. The two laboratories involved report a difference of about 3 parts in  $10^6$  in the absolute density of water at the reference temperature. A separate device for water density determination is under study by one national laboratory and is expected to show a measurement uncertainty lower than 1 part in  $10^6$ .

The natural variability of the density of mercury and the small number of laboratories equipped to make high precision relative or absolute measurements of mercury density pose a potential problem for the most accurate pressure measurements in the neighbourhood of 100 kPa. To improve the present situation the CCM has adopted a recommendation encouraging national laboratories to develop and maintain their existing capabilities in this field.

The CIPM-81 equation for the density of moist air has a form which is still valid but an improved measurement of air density can now be provided if some changes are taken into account. These changes concern: an improved estimate of the molar gas constant  $R$  recommended by CODATA, updated calculations of the saturation vapour pressure  $p_s$  and of the compressibility factor  $Z$  and the new temperature scale ITS-90. The CCM has, therefore, recommended a modification to the text adopted in 1981. A direct determination of air density made at one national laboratory to an accuracy of 5 parts in  $10^5$  is in a good agreement with the CIPM-81 equation for the density of moist air. In a study being carried out by another national laboratory on the influence of air density variations on balance readings, three methods have been compared. These use: 1) density calculations based on the CIPM

formula which include environmental parameters, 2) calculations based on the weighing of artefact standards having equal nominal mass and surface, but highly different volumes and, 3) a laser refractometer. Comparisons between the first and the third method are, so far, satisfactory.

### *Force*

Numerous international comparisons have allowed the establishment of a network which links the force standards installed in primary laboratories in Europe, the USA, Japan and People's Rep. of China. Data on uncertainty determinations lead to the following conclusions :

1. An interaction exists between the measurement standard and the transducer under test which depends on the transducer position on the machine.

2. International comparisons of ten force standard deadweight machines carried out to 1 MN in the period 1980-1988 show relative differences in the mean value of 5 parts in  $10^5$ , whereas the theoretical relative uncertainty of each machine is 2 parts in  $10^5$ .

3. International comparisons of seven hydraulic-amplification machines and eight lever-amplification machines carried out to 1 MN from 1980 to 1988 show relative differences in the mean value of 5 parts in  $10^4$  whereas the theoretical relative uncertainty may vary between 1 part in  $10^4$  and 5 parts in  $10^4$ .

4. The two comparisons were executed with a hydraulic load-generating machine and a pyramid (build-up) system of load measuring transducers, where an unknown transducer is calibrated against three reference transducers. For loads higher than 1 MN a hydraulic load-generating machine, which serves as a comparator between a reference force transducer and the transducer to be calibrated, can be used. The accuracy achievable with the pyramid and the reference transducer methods is of order 1 part in  $10^3$ . Such methods are suitable when loads are higher than 1 MN and their continued application (development) is advisable for the purpose of improvement.

In connection with industrial specifications, it appears that the national laboratories use different specifications for the calibration of force transducers. It seems therefore that two types of specifications should be available to meet practical needs, one for high-accuracy transducers and another for low-accuracy transducers.

### *High pressures*

The international comparison of pressure measurements in a liquid medium from 20 MPa to 100 MPa, which was begun in 1981 and carried out in four phases, was completed at the end of 1990. Seventeen laboratories participated in this comparison under the responsibility of a pilot laboratory. The transfer standard was an oil pressure balance. The results show a dispersion of 233 parts in  $10^6$  at the lower pressures, though for ten laboratories it is within 53 parts in  $10^6$ . The dispersion of the values at the highest pressure, 100 MPa, increases to 414 parts in  $10^6$ , though at eleven laboratories it is within 78 parts in  $10^6$ . Since its beginning, this exercise has shown up an unexpected phenomenon, the instability of the effective piston area as a function of time. This was taken into account in comparing the results of the different laboratories by assuming a linear variation with time.

The recent activities of the Working Group on High Pressures include :

1. Organization of an international seminar on « High pressure metrology » in May 1988 and publication of the Proceedings jointly with the BIPM (*BIPM Monographie 89/1*).
2. Determination by experimental techniques and calculations of the distortion coefficient of piston-cylinders used in pressure balances.
3. Studies of pressure transducers for use as transfer standards in the gigapascal pressure range.
4. Studies of a range of effects on gas piston gauges relating to their use under absolute and relative conditions and with different gases.
5. Dynamic pressure measurements.

#### *Medium pressures*

An international comparison in the pressure range from 10 kPa to 140 kPa is in progress. The transfer standard is a special pressure balance able to operate under absolute conditions (pressure referred to vacuum) and relative conditions (gauge mode-pressure referred to the ambient atmosphere). Nine laboratories have so far participated, three more will almost certainly join in the exercise and four others are likely to join. The results so far obtained show that :

1. The differences between mean values obtained by the participants are far greater than the uncertainties due to the dispersion of individual laboratory values on the basis of standard derivations communicated by the laboratories.
2. Repeatability of the results is better at higher pressures than at lower ones.
3. There is no evidence of significant variation of the effective area either with pressure or with time.
4. A very small difference was observed between mean values, which depends on whether the balance was working under absolute or relative conditions. Future comparisons may be extended upwards to 1 MPa and downwards to 1 kPa.

#### *Low pressures*

The standards used for the first international comparison of pressures from 1 Pa to 1 kPa were capacitance diaphragm transducers and these display sizeable non-linearity due to gas transpiration and thermal instabilities. The results obtained show differences so large that a revision of the transfer standard responsible for the dispersion appears advisable. In the light of the results, which have been analysed by the laboratories whose systems and equipment were used in the comparison, it was decided to carry out another comparison which is scheduled to start in 1992.

As regards the very low pressure range, it was agreed to choose a transfer standard suitable for comparisons at a pressure of  $10^{-7}$  Pa : this might be an ionisation gauge.

#### *Balances*

Tests undertaken at the BIPM and some national laboratories with the purpose of evaluating the performances of the Mettler HK 1000 MC type balance have led to improvements. At present the repeatability obtained in a comparison of several standard kilograms shows a standard deviation of 0,4  $\mu$ g and a reproducibility of 1,5  $\mu$ g. The BIPM is constructing a second flexure-strip balance designed like the first

one, to have a standard deviation in the comparison in air of one-kilogram mass standards of better than  $0.1 \mu\text{g}$ . This new flexure-strip balance will in all probability replace the NBS-2 balance. Other national laboratories are carrying out studies with a view to improving the performance of existing comparators, developing new types of comparators, making the process of weighing or of establishing new measurement methods.

## 9. The second and International Atomic Time

Prof. KOVALEVSKY presented his report, which included the reading of Draft Resolution A on time standards and time comparisons, and reminded delegations that draft resolutions would be put to the vote during the Conference session of Thursday 3 October 1991.

The 18th Conférence Générale des Poids et Mesures approved the taking over by the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) of responsibility for the establishment and dissemination of International Atomic Time (TAI) and, by extension, of Coordinated Universal Time (UTC) which departs from TAI only by a whole number of seconds. The ground had been prepared for this handover of responsibilities by the progressive transfer since 1985 of these activities from the Bureau International de l'Heure to the BIPM. On 1 January 1988 the BIPM was fully invested with these responsibilities and began to exercise all the functions which this work involves.

A little over a year later, in April 1989, the Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS) met to make an initial evaluation of this transfer and to study the conditions in which the work should be carried out to best assure the high metrological standards to which the TAI time scale must conform.

It should be noted from the outset that the problems posed by the preservation of the unit of time — the second — differ from those which arise with the other fundamental units for which the BIPM is responsible. There is in fact no standard of the second that can be preserved. What is realized in a certain number of laboratories is a standard frequency (caesium). But, on the one hand, these primary standards are so fragile, complex and highly dependent on the environment that there can be no question of making comparisons by transporting them. On the other, the establishment and maintenance of one or several such standards are so costly in terms of capital, maintenance and expert staff, that it does not make sense for the BIPM to construct and maintain its own primary standards.

Taking these considerations into account, the Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde undertook to carry out a study and suggest the best way of achieving the desired result, that is, to provide access to the unit of time and to ensure its dissemination. This access is obtained by the establishment of the International Atomic Time scale (TAI) based on the realization of the second through clocks controlled by primary standards based on the caesium frequency and by comparisons with time scales established in different countries and laboratories. Hence the two essential aspects of the work of the CCDS are: to encourage the improvement of primary frequency standards and to ensure the uniformity and availability to users of the TAI scale by recommending that the BIPM should be accorded all the means required to best carry out its work, now and in the future.

*Primary frequency standards and the realization of the unit of time*

Over the past four years, a number of laboratories have been working in the field of caesium frequency standards. Several primary standards are in the course of construction, some based on novel concepts, notably the use of optical pumping. An accuracy of the order of  $10^{-14}$  is sought. The entry into service of new primary clocks is becoming increasingly important and urgent as certain standards, now in operation for five or even ten years, have become less reliable and others have been withdrawn. A consequence is that for three years now conformity of the TAI unitary interval with the SI second has almost exclusively been guaranteed by two primary clocks at the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) which are by far the most stable and accurate. This situation is, however, unsatisfactory and other, completely independent, standards which can make contributions of equal weight are required to ensure against any systematic bias which may exist and evades current analysis. This is why the CCDS seeks to lay particular stress on the need to improve existing primary caesium standards and to establish new ones. There is, moreover, a need for innovation in the concepts on which standards are based if fresh progress is to be made, as the last few years have seen a certain stagnation in this field. The CIPM feels that this is an important point and this request is included in Draft Resolution A 'Time standards and time comparisons' which has been submitted to the Conférence Générale.

The race towards greater long-term stability and consequently towards improved definition of the second is not the result of a « sporting » desire always to do better. Real needs exist, and the CCDS has discussed these needs in the field of very long baseline radio-interferometry and, especially, for the timing of pulsars, whose applications range from a considerable improvement in knowledge of the terrestrial orbit to the detection of gravitational waves. Long-term stability of time scales, of the order of parts in  $10^{16}$ , would be required. Note, however, that although pulsars may constitute clocks of great stability, the continuous drift of their periods means that they cannot currently be considered as standards of time.

This search for greater stability justifies the numerous projects itemized by the CCDS which attempt to use elements other than caesium. Much work is thus being carried out on hydrogen masers whose stability is of the order of parts in  $10^{15}$  per day. Other research has taken place on the use of  $\text{Ba}^+$ ,  $\text{Be}^+$ ,  $\text{Mg}^+$ , and  $\text{Hg}^+$  ions which may become the basis of future primary standards. Another objective is to link microwave standards with standards in the visible region, an objective which is also important for the realization of the metre.

As already indicated, the BIPM cannot at the moment attempt to establish a primary frequency standard. On the other hand, it has an essential role in comparing standards, a role which it can and must play as an active centre of comparison of time scales.

*Comparison of time scales*

While there has been some slow down in progress in the laboratory realization of the SI second, great progress has recently been made in techniques of clock comparison at a distance, with an increase in accuracy of one to two orders of magnitude. This advance is the result of work carried out on the use of the Global Positioning System (GPS) for the comparison of clocks. This point was discussed at length by the CCDS

as well as by the Working Group on improvements to TAI which met under its auspices. It now appears that, in the normal functioning mode of the GPS, a precision of better than a nanosecond can be obtained if a certain number of precautions are taken. These include observation on two frequencies to compensate for the effects of ionospheric refraction, the determination of the positions of antennas in a single terrestrial reference system, and the attainment of a high stability in the environmental conditions of the receivers. The conditions relating to geodesic links between antennas were deemed sufficiently important by the CIPM to be included in the draft Resolution to this Conférence Générale.

A major difficulty may arise if the GPS system is placed in a situation of deliberate degradation for all users except those having military receivers able to work in the so-called 'Selective Availability' mode. This mode renders inaccurate the indications of the on-board clock, as well as the transmitted ephemeris of the satellite. Several solutions have been envisaged by the CCDS in the event of Selective Availability being implemented, notably in order to obtain exact ephemeris a posteriori.

Most laboratories creating a time scale are now equipped with GPS receivers and the BIPM, at the request of the CCDS, is responsible for the organization and coordination of observations by these satellites and for the global treatment of the data to obtain the TAI scale. The BIPM must also carry out studies aimed at improving the quality of time comparisons. This has already been done with the construction of a dual-frequency receiver at the BIPM under the direction of a guest engineer from Japan. This has enabled more accurate estimates of the ionospheric delay to be made. This type of activity should be continued, and it is for this reason that the CCDS feels that the BIPM should be equipped with clocks and GPS receivers with which to carry out tests and experiments on the synchronization and comparison of time scales. In any case it seems essential that the BIPM, being responsible for collating and synthesizing the results of clock comparisons, should have expertise in the techniques used in obtaining such data and not be dependent on a national laboratory. The budget request for the years 1993-1996 thus includes an exceptional item to cover the cost of installing and maintaining a time station. In the meantime, the BIPM has already begun this work, thanks to a loan of a commercial caesium clock from the US Naval Observatory (Washington).

A system equivalent to the GPS established by the USSR, the Global Navigation Satellite System (GLONASS), allows similar time comparisons to be made. The CCDS wishes to see this system used in parallel with the GPS, specifically to ensure the accurate comparison of TAI with the Soviet time scale UTC (SU) stabilized by many hydrogen masers and based on several caesium standards. It would be very useful if this scale could provide a major contribution to TAI, hence the importance of GLONASS as a new comparison method.

With this in mind, the CCDS has reviewed the other satellite methods of time comparison foreseen by Resolution 4 of the 18th Conférence Générale des Poids et Mesures. A number of such programmes are already under way, such as the LASSO (Laser Synchronization from Stationary Orbit) experiment, transmission tests via the MARECS-B satellite, or the use of MITREX (Microwave Intercomparison Time and Range Experiment) modems within the framework of a EUROMET programme which permits accuracy of the order of a nanosecond. With this third technique, however, there are problems in obtaining the agreement of the various national authorities concerned in order to make systematic measurements.

As regards the establishment of TAI, in which over 40 laboratories and over 160 clocks now take part, the CCDS has looked into the algorithms in use and has encouraged the BIPM to continue the study of new algorithms and to test them with real data. Specifically, a secondary system of weighting based on considerations of short-term stability has been studied in addition to that based on long-term stability. Analysis of the deviations for each of the clocks showed that highly significant correlations exist between the frequency variations of certain clocks. This point still causes anxiety and the CCDS has asked the BIPM to study it in greater depth. At the same time, in order to improve the statistical independence of clocks and, generally, to allow interpretation of their variations in frequency, laboratories need to avoid, as far as possible, changes in the environmental conditions in which clocks are maintained and to ensure that the BIPM is informed in detail of any changes that do occur. These precautions can certainly improve the quality of TAI and this recommendation of the CCDS is taken up in the draft Resolution.

Finally, while, as we have seen, it is essential to increase the practical experience of the BIPM staff in time transfer, it is also necessary to increase their theoretical knowledge in the field of relativity. The accuracy of time standards already approaches parts in  $10^{14}$ . As these standards improve and the number of users requiring the highest accuracy increases we ourselves must aim at an accuracy of parts in  $10^{16}$  or better in the application of relativity. It is at the level of parts in  $10^{16}$  when second order effects come in that difficulties arise which will have to be faced at the BIPM. For this reason a special effort is required to ensure that this new competence in the application of special and general relativity develops at the BIPM. This goes hand in hand with the need for increased competence in those topics where this type of precision in the use of time scales is required, notably in very long baseline radio-interferometry and in pulsar physics.

In conclusion, it can be stated that the transfer to the BIPM of the work of establishing the TAI scale and of maintaining its accuracy with the help of comparisons with primary caesium standards is a complete success. The Working Group on improvements to TAI, which includes a certain number of users of this time scale as well as members of the CCDS, were keen to stress this success. But with each advance in technology the tasks of the BIPM become heavier and call for an increase and diversification of its expertise. The calibre of staff recruited in the Time Section of the BIPM leaves no doubt about its intellectual capacity to respond to these requirements. The CCDS and the CIPM request the Conférence Générale des Poids et Mesures to provide the Section with an equivalent material capacity through the acquisition and maintenance of a high-performance time station.

Prof. MARÉCHAL mentioned the importance of the problems raised by the CCDS and the BIPM work on time. However, Prof. Kovalevsky's report elicited no comment or discussion.

## 10. Electrical standards

Following the resignation of E. Ambler, former director of the NIST, the Comité Consultatif d'Électricité was without a President. The report had thus been prepared by Prof. D. Kind, President *ad interim*, but it was presented by Prof. SKÁKALA, Vice-President of the CIPM. In particular, he read out Draft Resolution B concerning the Josephson effect and quantum-Hall effect.

The direct realization according to their definitions of the SI units of electromotive force and electrical resistance, is a long and difficult task. On the basis of the best such realizations, each requiring many years work, the CCE assigned uncertainties no smaller than a few parts in  $10^7$  to our present knowledge of the volt and the ohm. Practical electrical metrology has now reached the stage, however, at which reproducibilities one or two orders of magnitude better than this can be achieved using systems based upon the Josephson and the quantum-Hall effects.

The discovery of the Josephson effect in 1962 and the quantum-Hall effect in 1980 and their subsequent application to electrical metrology have led to far-reaching changes in the way the electrical units are maintained. Experience gained over the years in applying the Josephson effect in metrology allowed a more rapid introduction of the quantum-Hall effect when its discovery was announced. By the time of the 18th Conférence Générale in 1987 it was already clear that the time had come for worldwide agreement to be reached on the application of these two macroscopic quantum effects to provide highly reproducible representations of the volt and the ohm with uniform values in all laboratories and coherence with the SI. Resolution 6 of the 18th CGPM instructed the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) to take the necessary steps to achieve this. The CIPM had asked the CCE to undertake the detailed technical discussions necessary to prepare the appropriate decisions of the CIPM. Informal meetings of experts had already taken place in 1984, 1986 and 1988 on the occasion of successive Conferences on Precision Electromagnetic Measurements in Delft, Washington and Tsukuba.

In parallel with the rapidly developing technology associated with the Josephson and quantum-Hall effects, important direct realizations of the SI volt and ohm were completed during these years. Much useful background information on the consistency of various realizations of the electrical units also became available through *The 1986 Adjustment of the Fundamental Physical Constants* published by CODATA. The CIPM in effect set two tasks for its CCE, the first was to choose appropriate values for the constants used with the Josephson and quantum-Hall effects for establishing standards of emf and resistance. The second was to give such guidance as was necessary to ensure worldwide uniformity in practice and nomenclature in the practical application of these effects.

The CCE met at the Pavillon de Breteuil in September 1988 under its then President Dr E. Ambler and had before it the reports of two *ad hoc* Working Groups set up by the CCE to draft recommendations on the Josephson effect and the quantum-Hall effect. These Working Groups jointly proposed to the CCE Recommendations which formed the basis of those adopted by the CIPM the following week. These recommendations, Recommendation 1 (CI-1988) and Recommendation 2 (CI-1988), were accompanied by statements from the CCE, approved by the CIPM, laying out the CCE's views on the way in which these recommendations should be applied. It was agreed to follow the suggestions of the CCE Working Groups and to use the term *Josephson constant* with the symbol  $K_J$  to denote the frequency-to-voltage quotient and to use the symbol  $K_{J-90}$  to denote its recommended conventional value. Similarly the term *von Klitzing constant* with the symbol  $R_K$  was adopted to denote the quantized Hall resistance of the plateau corresponding to  $i = 1$  and the symbol  $R_{K-90}$  to denote its recommended conventional value. Neither  $K_J$  nor  $R_K$  were intended to represent the combinations of fundamental physical constants  $2e/h$  or  $h/e^2$ , since to do so would imply an understanding of the physics of these effects which, at least at present, is not yet complete.

Both the CCE, in proposing, and the CIPM, in adopting conventional values for  $K_{J,90}$  and  $R_{K,90}$  were at pains to point out this does not constitute a redefinition of the SI units. Although the conventional values  $K_{J,90}$  and  $R_{K,90}$  are coherent with the SI, they cannot be used as bases for defining the volt and the ohm (meaning the present units of electromotive force and electrical resistance in the SI). To do so would change the status of  $\mu_0$  from that of a constant having an exactly defined value (and would therefore abrogate the definition of the ampere) and would also produce electrical units which would be incompatible with the definition of the kilogram and units derived from it. To avoid misunderstanding, the CCE and the CIPM added that symbols for electromotive force (electric potential, electric potential difference) and electric resistance, and for the volt and the ohm, should not be modified by adding subscripts to denote particular laboratories or dates. Further guidance concerning the practical implementation of Recommendations 1 and 2 (CI-1988) was also given, including notes on how to word calibration certificates. In addition to the recommendations of the CIPM and statements of the CCE two further documents were prepared 'Technical Guidelines for Reliable Measurements of the Quantized Hall Resistance' and 'New International Electrical Reference Standards Based on the Josephson and Quantum-Hall Effects'. Both documents were published in *Metrologia*, **26**, pp. 47-62 and 63-68, in 1989.

The decisions of the CIPM embodied in Recommendations 1 and 2 (CI-1988) came into force on 1 January 1990 (the date chosen to implement the ITS-90). The use of  $K_{J,90}$  and  $R_{K,90}$  by national laboratories and the BIPM in establishing new reference standards for electromotive force and resistance immediately led to a significant improvement in worldwide uniformity in the measurement of these quantities. In the short time that has elapsed since 1 January 1990 further significant progress has been made in improving the reproducibility of these standards. Reference standards for electromotive force based on 1 volt arrays of Josephson junctions having reproducibilities of better than one part in  $10^9$  already exist at the BIPM and elsewhere. Reference standards for resistance based upon the quantum-Hall effect are now realized at the BIPM and elsewhere with reproducibilities of one part in  $10^8$  or better.

It must not be forgotten that these reference standards, although highly reproducible, have assigned uncertainties with respect to the SI volt and ohm of 4 parts in  $10^7$  and 2 parts in  $10^7$  respectively. Improvements in these uncertainties can only come through new absolute realizations of the SI units, a long and difficult task. It was just because the Josephson and quantum-Hall effects can lead to reference standards for the volt and ohm that are between one and two orders of magnitude more reproducible than these uncertainties in their absolute values that  $K_{J,90}$  and  $R_{K,90}$  were adopted. On the assumption that  $K_J$  and  $R_K$  are indeed equal to  $2e/h$  and  $h/e^2$ , the values chosen for  $K_{J,90}$  and  $R_{K,90}$  are consistent with and well within the uncertainties resulting from *The 1986 Adjustment of the Fundamental Physical Constants* published by CODATA. It is not expected that new values of  $2e/h$  and  $h/e^2$  calculated from a later Least-Squares Adjustment, will lead to changes in the adopted values for  $K_{J,90}$  or  $R_{K,90}$ , nor indeed would this be desirable.

In 1987, to help in the preparation of the adoption of the value for  $R_{K,90}$ , an international comparison of  $1 \Omega$  resistance standards took place at the BIPM. The results of this comparison were important in demonstrating the agreement between measurements of  $R_K$  in terms of  $\Omega_{69-91}$ . Twelve laboratories that already used the quantum-Hall effect to monitor resistance standards participated. Among these, six claimed relative uncertainties of  $3,6 \times 10^{-8}$  or less. Excellent agreement was found

between values of  $R_K$  from five of these six laboratories; the total spread, expressed as a fraction of  $R_K$  was  $6,6 \times 10^{-8}$ . One result of special significance is that the value of  $\Omega_{69-91}$  deduced from the comparison results agreed to within  $5 \times 10^{-9} \Omega$  with the value predicted from the well-established drift curve based on comparisons with the CSIRO calculable capacitor since 1964. Following the adoption of  $R_{K90}$  a new international comparison of  $1 \Omega$  and  $10\,000 \Omega$  resistance standards took place at the BIPM at the end of 1990. Ten of the eighteen participating national laboratories already use the quantum-Hall effect to realize their reference standards. The average results from these ten laboratories differ from those obtained by the BIPM by  $(-2,6 \pm 1,5)$  parts in  $10^8$  for  $1 \Omega$  standards and  $(-1,1 \pm 1,8)$  parts in  $10^8$  for  $10\,000 \Omega$  standards. These excellent results confirm the consistency of resistance standards based on the quantum-Hall effect and the accuracy of the determination of resistance ratios.

In 1990 the BIPM took the initiative in organizing with the LCIE and EUROMET the production by the Laboratoires d'Électronique Philips of a large number of quantum-Hall samples for metrology. Some two hundred samples were obtained by the BIPM and subsequently made available to laboratories of the CCE.

The CCE Working Group on Radiofrequency Quantities has continued to organize many international comparisons. Since the last Conférence Générale four comparisons have been completed, four abandoned and a further eighteen are in progress.

An important joint meeting of the CCE and the CCPR considered future work on fibre-optic metrology. The findings of this meeting are the subject of a report by the President of the CCPR.

Prof. MARÉCHAL thanked Prof. Skákala and invited comments. Dr CLAPHAM (United Kingdom) wished to make two observations. The first was of a substantive nature. The report on electrical standards mentioned that the conventional values adopted for the Josephson and von Klitzing constants for use in practical realizations came into force on 1 January 1990. Consequently, many laboratories had already readjusted their standards and modified their practical scales. When the CIPM recommended these values, the implication was that changes were not envisaged for many years to come. For obvious reasons, frequent change is not a good thing. Draft Resolution B recommends that laboratories work to reduce the uncertainty in the knowledge of the values of the constants in question. Dr CLAPHAM feared that this could result in changes being made to the agreed values, whereas at the time of their adoption nothing of the kind had been envisaged in the foreseeable future.

Dr Clapham's second point was a reminder that the United Kingdom was currently celebrating the bicentenary of Michael Faraday (born in London on 22 September 1791). As the possibility is now beginning to emerge of a new definition of the kilogram, based on electromagnetic fields, he thought that it would be singularly appropriate to pay tribute to the pioneering work of Michael Faraday who, two centuries ago, opened up research in the field of electromagnetism.

Prof. KOVALEVSKY replied in support of Dr Clapham's second point. However, as far as the Josephson and von Klitzing constants were concerned, he wished

to point out that the report made quite clear that no change was envisaged in the foreseeable future. Such a change would be totally undesirable.

Dr LYONS wholeheartedly approved Dr Clapham's remarks.

Prof. KIND mentioned that delegations must be especially careful not to lose sight of the possible difference between a value accepted by convention and the « true » value of an SI constant. He pointed out that in this context industry had pressed for representations, based on macroscopic quantum effects, of the volt and the ohm. The decision on the values of constants which allow these units to be realized on this basis meets their demand. They are satisfied. It remains important, however, to establish with still greater precision the difference between  $K_{J-90}$  and  $K_J$  and between  $R_{K-90}$  and  $R_K$ .

Prof. KIND also pointed out that, as delegates would appreciate, the BIPM had done what was required to supply the laboratories with essential instruments, such as transfer standards. The BIPM had perfected and supplied the samples used for the quantum-Hall effect. Delegates may also care to note that the BIPM is doing the same thing with standard lamps and laser tubes. In fact when industrial suppliers are slow to respond to demand for specific equipment from single laboratories. The BIPM can help by placing group orders. It seems important to support this kind of intervention on the part of the BIPM, since it allows national laboratories to benefit from the latest discoveries.

## 11. Temperature, the International Temperature Scale of 1990

Prof. MARÉCHAL asked Dr PRESTON-THOMAS, President of the Comité Consultatif de Thermométrie, to present his report.

The work of the Comité Consultatif de Thermométrie (CCT) in the four years since the 18th Conférence Générale (in 1987) can be summarized as: the continuing to completion of the many years of work directed to the generation of a substantially improved and extended replacement of the International Practical Temperature Scale of 1968 (IPTS-68), together with supporting documents to facilitate practical temperature measurements on, or derived from, the new scale. The replacement International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) was adopted by the CIPM in October 1989 and came into effect on the first of January 1990; the supporting documents « *Supplementary Information for the ITS-90* » and « *Techniques for Approximating the ITS-90* » were published in December 1990 and July 1990 respectively. Accounts of some of the work carried out in the course of generating the ITS-90 have appeared in the scientific literature and in the Report of the 17th meeting of 1989 of the CCT. I expect that several additional papers will appear in 1992, in particular at the Seventh Symposium on Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, to be held in Toronto in April 1992.

At the 18th Conférence Générale, I explained that in 1984 the CCT's work on a replacement temperature scale had encountered difficulties that could not at that time be resolved, but that these had now (i.e. in 1987) in principle been overcome. As a result, in 1987 the CCT was expecting to complete the scale about a year before its promulgation in January 1990.

It transpired that the difficulties were still being underestimated. Despite an immense amount of hard work on the part of dedicated individuals, of the four long-established working groups dealing with specific problem areas, and of an additional *ad hoc* working group that met three times to discuss and assess new developments and proposals, there were still questions to be resolved and decisions to be taken at the meeting of the CCT itself in September 1989.

That this process was so lengthy a one, despite the hard work of so many people, was a consequence of the number and extent of the changes and innovations that were required if the ITS-90 was to avoid many of the shortcomings of its predecessors. The more important of these are that the ITS-90 :

- extends to lower temperatures, 0.65 K instead of  $\approx 13.8$  K of the IPTS-68, and hence also replaces the EPT-76 from 0.65 K to 30 K,
- is in closer agreement with thermodynamic temperatures,
- has improved continuity and precision,
- has a number of overlapping ranges and sub-ranges, and in certain ranges has alternative but substantially equivalent definitions,
- includes new versions of the helium vapour-pressure scales which are not merely recommended but are an integral part of the Scale,
- includes a gas thermometer, calibrated at three fixed points, as one of the defining instruments,
- sets the upper limit of the platinum resistance thermometer used as a defining instrument at the freezing point of silver ( $\approx 962$  °C), replacing the 630 °C limit of the IPTS-68,
- has eliminated the Pt-10 %Rh-Pt thermocouple (which has an accuracy of, at best, 0.2 °C) as a defining instrument of the Scale (and thus has also eliminated the slope discontinuity which existed in the IPTS-68 at 630 °C, the junction between the platinum resistance thermometer and thermocouple ranges),
- has set the lower limit of the range based upon the Planck radiation law at the freezing point of silver instead of at the freezing point of gold, and allows any one of the silver, gold or copper points to be selected as the reference point for this part of the Scale.

One of the guiding principles in setting up the ITS-90 was that it should allow the user as much choice in its realization as was compatible with an accurate and reproducible scale. For this reason the scale includes many sub-ranges; within all except one of these  $T_{90}$  is defined independently of calibration points outside the range. Thus, if a platinum resistance thermometer is to be calibrated over the whole of the low temperature range from  $\approx 13.8$  K to 273,16 K, all of the eight calibration points in that range must be used; if, however, a calibration only in the range from the triple point of argon ( $\approx 84$  K) to the triple point of water is required, then only the three calibration points in this range are needed,  $\approx 84$  K,  $\approx 234$  K (Hg triple point) and 273,16 K. Similarly, in the range above 0 °C, a thermometer may be calibrated from 0 °C to 30 °C using just the triple point of water and melting point of gallium. This last range offers the simplest possible way of achieving the highest accuracy thermometry in the room temperature range; it allows the user to avoid the trouble and expense of setting up calibration points at temperatures outside the range of interest (as far as 419 °C or higher for all earlier scales), and in addition it allows the thermometer itself to be maintained under the best possible conditions by

not requiring it to be heated significantly above the temperature of normal use. The price that is paid for this useful flexibility in the Scale is the presence of a certain level of sub-range inconsistency and increased non-uniqueness compared with a scale having no overlapping ranges or sub-ranges. At present this loss of precision is very slight, as it is substantially masked by the imprecision resulting from differences between thermometers, in particular the platinum resistance thermometers. If, in the future, better manufacturing procedures substantially reduce these differences, it may be advisable to modify the sub-ranges (perhaps eliminating the 24 K to 273 K one) and to replace one of the calibration points (the excellently-positioned but difficult-to-realise xenon triple point may replace the current badly-placed but readily realized mercury triple point).

Two perceived, but hardly justified, criticisms of the ITS-90 when compared with the IPTS-68 are its increased complexity (for example 17 in place of 12 defining fixed points) and its increased cost of realization (a resistance thermometer in place of a thermocouple) in the 630 °C to 962 °C temperature range.

With regard to complexity, the ITS-90 requires 12 fixed points (others are optional) to cover the full range of the IPTS-68 (which itself required 10 points, 2 being alternatives), and the ITS-90 provides greater precision (much greater, by a factor of the order of fifty, in the 630 °C to 962 °C range). Moreover, the ITS-90 has a lower limit of 0.65 K, rather than the 13.8 K of the IPTS-68, and thus also replaces the EPT-76 scale and its 11 (7 additional to those of the IPTS-68) fixed points. It should also be remembered that in many cases the sub-ranges of the ITS-90 allow the use of fewer fixed points, down to a lower limit of two, than is the case for corresponding measurements of the IPTS-68.

The cost of the high temperature platinum resistance thermometer and its calibration up to 962 °C, with its resulting fifty-fold increase in accuracy, is indeed much greater than that of the corresponding Pt-Rh/Pt, 630 °C to 1 064 °C, thermocouple calibration on the IPTS-68. However, there is now available an Au/Pt thermocouple to cover the 630 °C to 1 000 °C range; this, although a secondary instrument, provides a five to ten-fold increase in accuracy up to 962 °C and in precision up to 1 000 °C over the primary instrument of the IPTS-68. It seems likely that a palladium/platinum thermocouple will in the future be available, with a precision approaching that of the Au/Pt and a range up to at least 1 200 °C. These thermocouples are both, comparatively speaking, low-cost instruments. Thus a substantial increase in accuracy over that of the IPTS-68 is available at no increase in cost, while a further substantial increase in both accuracy and cost is found in the ITS-90 itself.

The last important output of the CCT that I referred to earlier is the two supporting documents to the ITS-90. The *Supplementary Information for the ITS-90* gives, in greater depth and — I think — in a more readily assimilable form than was the case for its predecessor, the practical details and supporting information required by a thermometrist who desires to make measurements of the highest possible accuracy. The document *Techniques for Approximating the ITS-90* is directed to the ninety or so per cent of thermometrists for whom cheaper and more conventional measuring methods suffice. These two documents, which we expect to be updated at five- to ten-year intervals, constitute between them a vade-mecum suitable for nearly all temperature measurement problems (exotic ones, such as measuring plasma temperatures in the millions of degrees or measuring the temperature of a rapidly cooling single nylon thread, are not addressed).

The IPTS-68 was adopted in response to an urgent requirement to extend substantially the lower limit of the IPTS-48 (the change was from  $\sim 90$  K to  $\sim 14$  K). At the time of its adoption it was known to be unsatisfactory in many respects, and since 1971 the CCT has been engaged in preparing a replacement. The earlier, rather deliberate, pace of progress became frenetic during the last few years. It should now, for a period at least, slow down enormously. As I mentioned earlier, revisions of the supporting documents will be required periodically, while requirements by thermometrists for increased precision may require minor adjustments to the ITS-90. There is as yet no useful, simple way of checking the quality of a platinum resistance thermometer: meeting the requirements incorporated in the ITS-90 are a necessary but not a sufficient indication of quality and better ones should be searched for. And we are, and will continue to be, anxious to improve our rather uncertain knowledge of the numerical relation between the International and the thermodynamic temperature scales. These and similar matters will command the future attention of the CCT, which I expect will hold meetings at intervals of four to six years for the next little while, with the various working groups continuing to provide, compile and report on relevant information in the intervals.

At the close of his report Dr PRESTON-THOMAS wished to pay particular tribute to the efforts of members of the Working Groups set up by the Comité Consultatif de Thermométrie. In his opinion it was thanks to the substantial amount of work carried out by these groups that it had been possible to realize a scale which is a great improvement on the previous one and which would not need to be modified for a long time to come. He was truly grateful to the members of these Working Groups, some of whom were taking part in the present Conference.

He then read Draft Resolution C on the International Temperature Scale and future work in thermometry.

The presentation of this report elicited no comments or discussion.

## 12. Photometry and radiometry

Dr BLEVIN, President of the Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie, was then asked to present his report.

Since the 18th CGPM, the CCPR has met twice at the BIPM: The first occasion was a special fact-finding meeting on optical fibres, held on 30 September 1988 jointly with the Working Group on Radiofrequency Quantities of the Comité Consultatif d'Électricité (CCE-GTRF). The second occasion was the 12th session of the CCPR, held on 17-19 September 1990.

### *Photometry*

In 1987 and early 1988, the BIPM and several national laboratories adjusted the values attributed to their photometric standards, as a consequence of the sixth comparison of national standards of luminous flux. The BIPM values were brought into correspondence with the mean values from the comparison. The magnitudes of residual differences between the national standards and the BIPM standards were

published in *Metrologia*, 1988, **25**, p. 125, thus enabling systematic corrections to be applied when comparing photometric measurements made in different countries. In 1990 the US national laboratory adjusted its photometric standards, thus bringing them closer to the international means.

Two of the continuing limitations in photometric comparisons have been lamp instabilities and the difficulty in aligning lamps adequately. The CCPR has therefore decided that the next comparison of national photometric standards will not employ lamps as the artefacts to be circulated, but instead use silicon photodetectors fitted with well-corrected  $V(\lambda)$  filters. Such a comparison is not planned to take place until after the next CCPR meeting, tentatively planned for 1994, but meanwhile a Working Group has been formed to make recommendations on the selection of suitable photodiodes and filters.

### *Radiometry*

The most accurate instruments yet devised for measuring radiant power are electrical substitution radiometers used at liquid helium temperatures. These so-called cryogenic radiometers are being used increasingly in the national laboratories and are also becoming available commercially. For laser radiation, they enable radiant powers to be determined with uncertainties of 1 in  $10^4$  or less.

The CCPR plans eventually to conduct a comparison of power measurements made with the cryogenic radiometers held by national laboratories, but has decided that this should wait until after 1994. A portable cryogenic radiometer might well be required for such a comparison, and the BIPM has been requested to prepare a recommendation on the most appropriate artefact for use.

An alternative approach to radiant power measurements is to use silicon photodiodes whose internal quantum efficiencies can be predicted accurately over most of the visible spectrum. A number of national laboratories find this to be a simpler and more economical starting-point for establishing their radiometric scales.

### *Optical fibre technology*

The joint meeting of CCPR and the CCE-GTRF had been arranged by the CIPM to discuss metrological requirements in the economically important field of optical-fibre technology. It was noted by the meeting that some of these requirements were being attended to by other international bodies such as the International Electrotechnical Commission and the Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique. Moreover, many aspects of this field of technology were considered as too specialized to be within the scope of the CIPM.

Nevertheless, it was agreed that in the field of optical fibres the CCPR might appropriately concern itself with the measurement of radiant power and associated quantities and the CCE-GTRF with the measurement of optical attenuation.

The CCPR has indeed been conducting a comparison of radiant power measurements at the wavelengths 1 300 nm and 1 550 nm widely used for fibre-optic communications. The first phase of this comparison involved only four national laboratories, those of the USA (coordinating laboratory), Australia, Germany and UK. Agreement to within about  $\pm 0,2\%$  was attained, a result that well satisfies industrial requirements. The second phase is a wider comparison involving 13 laboratories and its results are expected by the end of 1991.

### *Spectroradiometry*

The CCPR has conducted a comparison of measurements of spectral irradiance over the wavelength range 250-2 400 nm, tungsten-filament lamps being used as the radiation source. Fourteen laboratories participated. Preliminary results were presented to the 1990 session of CCPR and the final report will become available during 1991.

The results in the visible spectrum show a small improvement over the previous comparison (1975), but agreement in the air-ultraviolet and near-infrared regions is poor.

The CCPR considers it especially important to improve the accuracy in the ultraviolet region. At the 1990 session it particularly discussed the possible advantages of using a synchrotron electron storage ring as the primary standard instead of the traditional high-temperature blackbody. There is evidence that appropriate synchrotrons have significantly lower uncertainties as primary standards, but this advantage can be offset by the difficulties encountered in calibrating secondary standards against synchrotrons.

A Working Group has been established to study alternative techniques, including synchrotron radiation, for improving the worldwide uniformity of spectroradiometric measurements over the ultraviolet range 200-400 nm. A preliminary report is expected in 1991.

### *Measurements of spectral responsivity*

One of the most basic requirements of photometry and radiometry is a capability to measure accurately the spectral responsivities of photodetectors. The national laboratories have attempted to compare such measurements in the past but have had limited success because of instability of the photodetectors used and the inability of the BIPM to serve as the coordinating laboratory.

Both of these difficulties have now been overcome. A few different sources of stable silicon photodetectors have been identified, and over the past four years the BIPM has developed the necessary equipment and expertise to intercompare the spectral responsivities of photodiodes with high precision.

The CCPR has therefore decided to proceed with such a comparison, with the BIPM serving as the coordinating laboratory.

### *Other matters*

The CCPR is concerned about the uncertain availability from commercial sources of lamps suitable for use by national laboratories in maintaining and comparing their photometric and radiometric standards. It has therefore established a Working Group, with the BIPM as convener, to assess the situation and make appropriate recommendations.

Over the past six years radiometrists from around the world, mainly from the fields of metrology, meteorology and space science, have held three specialist meetings on new developments in optical radiometry. The last of these was associated with the 12th session of the CCPR and held at Davos on 20-22 September 1990. Although the CCPR is not formally a sponsor, it is further proposed to associate one of these meetings with future CCPR sessions. I believe that this will prove beneficial both to the national laboratories and to the BIPM.

In reply to a question from Dr LYONS concerning the problem of the supply of standard lamps from commercial sources, Dr BLEVIN said that the CCPR was increasingly in favour of taking steps to help individual users but in any case reliable sources of suitable standards were required. He believed that a small committee at the NIST had been looking into the question of suitable lamps. He invited the President of this committee to join the CCPR Working Group responsible for this research.

On a different topic, Dr BLEVIN added that the proceedings of a radiometry conference held last year in Davos was to be the subject of a special issue of *Metrologia*. He considered this to be an excellent example of the kind of initiative that would increase the journal's readership.

The session closed at 17 h.

\*  
\* \*

At 18 h, delegates to the Conférence Générale were invited by His Excellency the Ministre des Affaires Étrangères to a reception at the Centre de Conférences Internationales, avenue Kléber.

In the event, Prof. MARÉCHAL, acting President of the Conference and Member of the Académie des Sciences de Paris, represented the French authorities in place of the Minister, who was not able to attend. He welcomed the guests with the reminder that France is always keen to encourage international cooperation.

---



---

## VISIT TO THE BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Tuesday 1 October 1991, 15 h

---

As is customary, the delegations to the Conférence Générale were invited to visit the laboratories of the Bureau International des Poids et Mesures. It was thus possible for them to meet the physicists who, among other examples of work in progress, showed them :

- the resistance standard based on the quantum-Hall effect and the electrical potential standard based on a Josephson junction network ;
- the installation for measurement of gravitational acceleration ;
- the installations for the measurement and comparison of the various lasers in use and under study ;
- the progress of the third periodic verification of national prototypes of the kilogram as well as studies of surface effects on platinum-iridium mass standards, the determination of the magnetic susceptibility of « non-magnetic » materials used for mass standards and the construction of balances ;
- the study of the properties of silicon photodiodes ;
- the reference standards for measuring basic quantities in the dosimetry of X-rays and  $\gamma$ -rays, as well as the liquid-scintillation measurement technique ;
- the reception of GPS signals and the measurement of ionospheric delays.

In the mechanical workshop, a numerically-controlled milling machine and a lathe were demonstrated.

Exceptionally, on this occasion, there was no visit to the Dépôt des Prototypes, because the international kilogram has been temporarily removed with the authorization of the CIPM for the third periodic verification of national prototypes of the kilogram currently taking place (*see* the report of the President of the Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées, p. 139).

\*  
\* \*

These visits were followed by a reception in the gardens of the Pavillon de Breteuil, hosted by the President of the Comité International and the Director of the Bureau International. During this reception Prof. DE BOER, former secretary of the CIPM, was presented with the insignia of the Légion d'Honneur by Prof. J. HAMBURGER, President of the Académie des Sciences de Paris. Prof. Hamburger gave the following address :

«Jan de Boer, if France wishes to honour you today, it is because you are considered to be a distinguished servant of science, technology and of our daily life. You have carried out an immense body of work as a member of the Comité International des Poids et Mesures for thirty-seven years and, consequently, you have inspired the activities of the Bureau International des Poids et Mesures. For twenty-seven years you have been Secretary of the CIPM. You have been in charge of the Secretariat of seven Conférences Générales.

«You are President of the Comité Consultatif des Unités and in this capacity you have played a major role in the considerable undertaking of perfecting the International System of Units. Indeed you have made us all suffer. It has not always been easy to abandon our good old milligrams for the millimoles that you have imposed upon us. Doctors and their patients are still resisting, and maliciously continue to talk about blood pressure in centimetres or millimetres of mercury rather than in kilopascals. Health-food restaurants persist in calculating their dishes in calories and not in joules, and women's magazines insist on singing the praises of low-calorie rather than low-joule diets. But these are rearguard actions. For scientists, there is no doubt that the committee you preside over has produced a clear, efficient and intelligent piece of work which represents definitive progress.

«The French admire something else about you. First of all, your wonderful command of our language, which is as you know one of our most cherished possessions. And then we are pleased that France, thanks largely to your work, is still the centre of development of the metric system and the home of the Bureau International des Poids et Mesures. I would even go so far as to say that it is not only in my capacity as President of the Académie des Sciences that I am speaking to you today: allow me also to speak on my own behalf. The link between Holland and France which you represent affects me, because my father was Dutch, struggled all his life in the cause of friendship between our two countries, founded the Association France-Hollande and carried his love for France so far as to marry a French girl, thus enabling me to be born in Paris and grow up French. The few drops of Netherlands blood that run in my veins increase my pleasure in this ceremony today.

«Monsieur Jan de Boer, I do not know you very well. But your friends have spoken of you a great deal. Thanks to them, and particularly to Jean Kovalevsky, I know that you are not only a scientist but also a man of great humanity, generous, loyal, and – which delights me even more – optimistic and confident of man and his destiny at a time when that is no longer fashionable. In short, you are one of those beings of whom the world has need today. Another indiscretion – I am aware what a help and support Mrs de Boer is to you, and that she deserves a good part of the decoration which it is my pleasure to present to you.

«Jan de Boer, in the name of the President of the French Republic, I pronounce you Chevalier de la Légion d'Honneur.»

Prof. J. DE BOER replied :

« Mr President of the Académie des Sciences,

« It is a great honour, on the occasion of the 19th Conférence Générale, to receive the exalted distinction which the President of the French Republic has seen fit to confer upon me. I beg you, Mr President, to be so kind as to convey to him my deepest gratitude.

« I am particularly moved by this sign of good will which honours my work with the Bureau International des Poids et Mesures and its Comité International.

« I am obviously extremely pleased by this mark of appreciation by the French Republic, where the Bureau International des Poids et Mesures has found, at Sèvres, its international home, but above all by the nation which has played a decisive role in the development of the metric system, the forerunner of the International System of Units to which our Bureau International is entirely devoted.

« The international territory which France placed at our disposal in the Parc de Saint-Cloud over a hundred years ago, is today, together with the Pavillon de Breteuil and its research laboratories, the world centre for scientific metrology at the high level required to maintain the International System of Units.

« France has always shown its indispensable cooperation in approving the construction of new buildings and laboratories in the Parc de Saint-Cloud, whose impressive beauty constitutes a national historical monument.

« I am particularly honoured that the distinction conferred upon me today should be accorded by the country which, historically, was at the origins of the principles of the metric system, which in turn gave rise to the International System of Units.

« The French Revolution has recently been commemorated once again. We have recalled the memory of such scientists as Condorcet, Lavoisier, Laplace, Monge, Delambre and Méchain. We should also recall the role of the celebrated Académie des Sciences which, at the time, strongly encouraged the reform of measurement through the introduction of the metric system. Later on the metric system was largely accepted by the world of science : we need only mention the names of Gauss, Weber or Maxwell, men who helped to develop the scientific basis for a metric system of units.

« Following the Exposition Universelle held in Paris in 1867, however, it was again here in Paris that a series of Conférences Internationales was launched which led to the signing of the Convention du Mètre and the creation of the Bureau International des Poids et Mesures at Sèvres. This was truly the first basic step in the development of the International System.

« After the war, I was privileged to be able to follow at first hand the evolution of the Bureau International and the development of the International System of Units. This was an eventful time, embracing new fields of physics, in order to arrive finally at a system of units which covers all fundamental aspects of physics and technology.

« I feel that it was a real privilege for me to work within a scientific community devoted to the development of metrology at the highest level, with a common aim :

to smooth the running of the *Système International*. I found there a deeply human satisfaction, that of collaborating in the development of a scientific system of intrinsic beauty.

« To close my remarks I would like to express my satisfaction and pleasure that I have been able to take part in the dissemination of the *Système International* to the peoples of the world. Condorcet's words come to my mind: 'For all men, for all time'. One can indeed say that the *Système International*, thanks to its simplicity, satisfied the growing demands of international technology and trade. New generations are growing up with this wonderful tool and that is truly a great source of satisfaction for those who are still endeavouring to improve this system. »

---

---

THIRD SESSION  
OF THE 19th CONFÉRENCE GÉNÉRALE  
DES POIDS ET MESURES

Wednesday 2 October 1991, 15 h

---

The PRESIDENT opened the session with the remark that the laboratory visit and reception of the previous day had been a great opportunity for everyone to meet the physicists working at the BIPM and to gain a better grasp of the role of the organization.

He also pointed out that the Working Group on the dotation to the BIPM for the four years 1993-1996 had presented its report. This document had been distributed to the delegations, enabling them to familiarize themselves with its contents before the item was raised.

### 13. Ionizing radiations

He then asked Dr QUINN to present the report of the Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants as, for health reasons, Prof. Sala, titular President of the CCEMRI, had been unable to attend the Conference.

Dr QUINN read the following report :

The use of ionizing radiations continues to increase not only in the fields of medicine and the production of energy, but also in numerous technical and scientific applications. As a consequence, there is a widespread need for the capability to measure type of radiation, range of energy, etc. For this reason, reliable standards are required for tasks which range from high-dose irradiations to radioprotection. The complexity of the physical phenomena involved in the measurement of ionizing radiations means that experimental work requires a wide range of equipment.

In medical and industrial applications an accuracy of about 1 % is needed in the standards set for X and  $\gamma$  rays, neutrons and radioactivity. Such accuracy is often difficult to attain. The CCEMRI oversees the BIPM in its task to ensure worldwide uniformity of measurements and to increase their accuracy. This goal can be approached, for instance by organizing the international comparison of a radionuclide, or, in dosimetry, by direct comparisons, in a well-defined radiation beam, of instruments used as national standards with the BIPM standard. All such work is planned in collaboration with the CCEMRI.

In 1989, the CIPM decided to broaden the membership of the CCEMRI, which then consisted of its President and the chairmen of its three sections, by increasing the membership to include four individuals of international repute in the field of ionizing radiations. The new committee met on 24 May 1991. The three sections of CCEMRI have met twice since the 18th Conférence Générale des Poids et Mesures: Section I (Rayons X et  $\gamma$ , électrons) from 11 to 13 April 1988 and from 21 to 23 May 1991, Section II (Mesure des Radionucléides) from 29 to 31 May 1989 and from 21 to 23 May 1991 and Section III (Mesures neutroniques) from 18 to 20 April 1988 and 21 to 23 May 1991. In the presentation which follows the work of the CCEMRI, as well as the corresponding activity of the BIPM, is presented under headings corresponding to the fields of activity of the three sections.

#### *X and $\gamma$ rays, electrons*

Many laboratories have asked to be linked to the standards of air kerma and absorbed dose in graphite and water, established and maintained at the BIPM. This has enabled national laboratories which maintain primary standards to compare measurements among themselves over a period of some twenty years. Nine comparisons involving seven countries have been performed since 1987. In the case of national laboratories which maintain only secondary standards, calibrations are made periodically at the BIPM. Work of this sort has involved thirty-six ionization chambers belonging to eight countries. The references of the International Atomic Energy Agency (IAEA) are also traceable to the BIPM. This organization, which coordinates a network of Secondary Standards Dosimetry Laboratories (SSDL) involving forty-nine countries, has now made two checks of its standards since 1987.

Following a recommendation of Section I of CCEMRI, the BIPM has developed a reliable standard for the measurement of ambient dose equivalent, a new quantity defined by ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements) for application in the field of radiation protection.

A theoretical study of the perturbation effect in the calorimetric standards used for measuring absorbed dose in graphite has resolved this long-standing problem.

In addition, careful studies, both experimental and theoretical, have led to the establishment of an ionometric standard for measuring absorbed dose in water. Its stability is excellent and it has a precision of about 0.3 %. An alternative method has also been used to measure this quantity. Called the scaling-theorem method, it is indirect but simpler. The two methods agree well. A comparison between the BIPM measurements and those from two national laboratories equipped with calorimetric standards has led to satisfactory results. A programme of calorimetric measurement has just begun. This will allow us to make a contribution to the understanding of problems associated with this method. It may, in addition, enable us to take part in measurements on high-energy photons.

#### *Radionuclide measurements*

Activity measurements performed at the BIPM can be subdivided into two groups: the international comparisons which concern absolute measurements, and the International Reference System (SIR) which is based on relative measurements. These two approaches are complementary.

The radionuclides chosen in recent years by Section II are among those which present particular experimental difficulties. Since a preliminary comparison of activity measurements of a solution of  $^{125}\text{I}$  among seven laboratories gave good results, Section II decided to start an international comparison using this radionuclide. The nineteen participants used eight methods. The observed 3,5 % dispersion of the results can be considered satisfactory.

For the subsequent preliminary comparison  $^{75}\text{Se}$  was selected. This radionuclide has an isomeric state at 304 keV, which renders its measurement especially difficult. The five participants succeeded in arriving at a dispersion of less than 2,5 %, a result which was deemed sufficiently good to merit the organization of a full-scale comparison.

Results from all these comparisons have been collated and analysed at the BIPM. In addition, the BIPM has performed a measurement of the half-life of the isomeric state of  $^{75}\text{Se}$ . As a result of the special precautions taken, the value obtained is about ten times more accurate than those of earlier studies.

The International Reference System (SIR), which allows comparison of the activity of  $\gamma$ -ray emitters, is still highly appreciated by participants. In the past fifteen years more than 550 ampoules with 50 different radionuclides have been measured. The success of this work has led Section II to request an extension of the existing system to include  $\beta$  and  $\alpha$  emitters. Studies made in collaboration with the NIST, have led the BIPM to acquire a liquid scintillation system. We are looking at how best to use the equipment in the framework of an extended SIR.

Investigations concerning the principles of the coincidence method and of counting statistics have continued successfully at the BIPM and several national laboratories. To illustrate the progress achieved I mention specifically the use of generalized dead times, a field which has opened new experimental possibilities, of which some are already in use. The background information, scattered in many reports, has now been published in a review article. Recently the BIPM has suggested an original approach to the old problem — for long considered as having no solution — which consists in measuring a true coincidence rate directly, i.e. without applying a correction for random coincidences. The method, which is based on parity measurements and does not involve any resolving time, has been implemented electronically and works as expected. The results of the investigations by the members of this working group of Section II are described in eighteen documents.

#### *Neutron measurements*

The main work performed in the field of neutron measurements includes the organization and analysis of the results of the international comparison of kerma rate measurements. In this exercise transfer instruments, studied and selected by the BIPM, were circulated among the participants. A good agreement was obtained for neutron kerma values in the local mixed fields, when measured with the BIPM equipment and with the local dosimetry systems.

In order to comply with a proposal of Section III, a liquid scintillation detector, equipped with a system permitting neutron-gamma discrimination, has been investigated in the 2,5 and 14,65 MeV neutron beams. The analysis of the neutron spectra will be done using theoretical spectra obtained by Monte-Carlo simulation.

At its recent meeting, Section III discussed the problem of neutron spectral measurements and recommended that the BIPM should develop the necessary instrumentation. In addition, BIPM was asked to maintain transfer standards and measurement capabilities in the neutron field.

At the meeting of the extended CCEMRI some specific points raised by the sections were considered in a more general context and the increasing relevance of ionizing radiations and their applications was reaffirmed. A survey of possible future work gave rise to recommendations made to the CIPM.

This report elicited no comments or questions.

#### 14. The International System of Units (SI)

Prof. DE BOER, President of the Comité Consultatif des Unités (CCU), was asked to present his report.

The International System of Units is a scientific and logical system well adapted to the international needs of science and technology and an essential requirement for the development of economic and commercial relations between all the nations of the world.

The four year period since the last Conférence Générale, the period covered by the present report, has been marked by the commemoration of a number of historic events of great significance for the SI. The most important of these were linked to the French Revolution which took place two centuries ago and was duly celebrated in 1989. The Comité International des Poids et Mesures was invited to visit an exhibition at the Musée National des Techniques in Paris which traced the history of the metre; the Comité was also present at a little ceremony in front of the Hôtel du Ministère de la Justice, in former times the Chancellerie de France in the Place Vendôme, Paris, at which the old metre made of marble and still sealed in the wall was re-measured by triangulation.

It is useful, therefore, on the occasion of the Conférence Générale to recall just for a moment the events that exerted such a decisive influence in the field of weights and measures. We bring back to mind just one of the historic events, one that took place not far from here just two hundred years ago.

It was on the 19 March 1791 that *Condorcet*, Secrétaire perpétuel of the Académie des Sciences, presented to the Assemblée Nationale the Academy's proposal for the adoption of the quarter of the terrestrial meridian as the basis for the unit of length, the metre. On 30 May 1791 Louis XVI formally approved the famous « Law related to the means of establishing uniformity in weights and measures ».

It was not until eight years later that the measurement of the arc of nine and a half degrees along the meridian between Dunkerque and Barcelona carried out by *Delambre* and *Méchain* to determine the metre and the measurements on the kilogram begun by *Lavoisier* and *Haüy* and continued by *Lefèvre-Gineau* were formally approved by a Commission of scientists from France and other European countries and the work concluded by deposition of the standards of the metre and the kilogram in the Archives of the Republic. This was truly the beginning of the metric system which is the origin of the SI now accepted the world over.

In the intervening two hundred years many scientists have worked to develop, from these historic bases, the modern concept of a universal system of units. Among them we must first list *Weber* and *Gauss* for their work on 'absolute' measurements of electric and magnetic quantities. We must remember also the work of *Maxwell* and *Thomson* in the British Association for the Advancement of Science. This led, for physics, to the development of a system of three dimensions founded on three base quantities, length, mass and time and in 1873 to the introduction of the coherent CGS system, based on the centimetre, the gram and the second, to express in a coherent way not only mechanical but also electrical and magnetic measurements.

After the signature of the Convention du Mètre on 20 May 1875 and the creation of the Bureau International des Poids et Mesures, now more than one hundred years ago, the first Conférence Générale des Poids et Mesures in 1889 replaced the so-called metre and kilogram 'of the Archives' by new international prototypes which were deposited in the vault of the Bureau International at Sèvres. The establishment of this international laboratory and the deposit there of the international prototypes with which it was entrusted marked the birth of the high precision metrology, essential for the maintenance of a system of units at international level.

These international prototypes of the metre and the kilogram were meant to serve as the metrological base for all physical measurements, but the electrical and magnetic units still caused problems. The International Electrical Congress had sanctioned since 1881 the use of an ensemble of 'practical units', the ampere, the ohm, the volt, etc. These practical units were not coherent with the CGS system; they were deduced from the coherent units of the CGS system by multiplication by 'convenient' powers of ten. In 1921, to resolve these problems, the sixth Conférence Générale explicitly extended the competence of the Convention du Mètre to include, among other things, the electrical units. Later on, the Comité International created a Comité Consultatif d'Électricité to deal specially with electrical units. This eventually led, at the international level, to a solution to the problem of systematic coherence of the ensemble of mechanical and electromagnetic units.

From the view-point of physical theory as well as for the description of electromagnetic phenomena it became necessary to revise the system of three dimensions developed by Maxwell and the British Association for the description of physical phenomena. During the last twenty years of the 19th century *Heaviside* and *Giorgi* found a natural way of including electromagnetic phenomena in physics. They showed that in order to do this it is necessary to have a system that includes four base quantities. *Giorgi* in particular had showed in 1901 that the metre, the kilogram and the second as the base mechanical units and, for example, the ohm or the ampere as the base electrical unit provide a system of units of four dimensions that allows inclusion of the ensemble of practical electrical units adopted in 1881 and confirmed in 1893 by the Chicago Conference.

The important contributions of *Giorgi* to the development of unit systems was the subject of an International Commemorative Conference held at the Istituto Politecnico in Turin on 21 and 22 September 1988. At this Conference, attended by a large number of scientists, the historical and metrological importance of the work of *Giovanni Giorgi*, and the influence he exerted on the later development of the International System of Units, was clearly brought out.

It is not necessary to continue here the well-known story of the International System of Units. Developments were interrupted during the war and it was in 1960 that the International System of Units, founded initially on six base units, the metre, kilogram, second, ampere, kelvin and candela, was adopted by the 11th Conférence Générale des Poids et Mesures. The seventh base unit, the mole was added by the 14th Conférence Générale.

The conservation of the International System of Units is one of the most important tasks of the Comité International and its Comité Consultatif des Unités. This year the 6th edition of the brochure *Le Système International d'Unités (SI)* has been published, bilingual like its predecessor. In it are assembled in a systematic way all of the Resolutions and Recommendations of the Conférence Générale and Comité International relating to the International System of Units. Also included are the explanatory notes and rules of application adopted by the International Organization for Standardization (ISO).

In 1990 the CCU held its 10th meeting at Sèvres during which the text of this brochure was discussed. The most important changes concerned Appendix II « Practical realization of the definitions of some important units » to take account of decisions taken by the CIPM in 1988 and 1989, decisions concerning the practical realization of electrical units and the entry into force of the International Temperature Scale of 1990. In this same Appendix the texts concerning mass and time were improved.

In addition, and in response to a request by the International Union of Pure and Applied Chemistry, the CCU recognized the need to introduce new prefixes for further powers of ten:  $10^{21}$ ,  $10^{24}$ ,  $10^{-21}$  and  $10^{-24}$ . In preparing its proposal, the CCU tried to respect the following rules: a) prefixes should end in 'o' for negative powers and 'a' for positive powers; b) symbols for prefixes should be capital letters for positive powers and lower case letters for negative powers.

The CIPM proposes that the Conférence Générale adopt these prefixes and symbols which appear in Draft Resolution D. The prefixes zepto and zetta evoke the number seven in latin 'septem' (the seventh power of  $10^{-3}$  and  $10^3$ ) but the letter 'z' has been substituted for the letter 's' to avoid the symbol 's' as a prefix. The prefixes 'yocto' and 'yotta' evoke the number eight, in latin 'octo' (the eight power of  $10^{-3}$  and  $10^3$ ) but the letter 'y' has been added to avoid the symbol 'o' as a prefix.

Prof. DE BOER read Draft Resolution D concerning the prefixes zetta, zepto, yotta and yocto.

Mr J. THOR asked to speak, not as a representative of Sweden but as Secretary of ISO/TC 12: « In the CCU report Prof. de Boer pointed out that the SI rules of application were adopted by the ISO. The complete rules are the object of international standard ISO 31. In different sections of standard ISO 31, the system of quantities on which the SI is based is also set out. The current edition of standard ISO 31 is now some ten years old. It has been revised by the ISO. During the last year all the sections of standard ISO 31 which have been revised have been approved by members of the ISO and the new edition will shortly be available. Mr President, allow me, in my capacity as Secretary of ISO/TC 12, to take this opportunity to thank two members of the CIPM for their major contribution to the revision of standard ISO 31. They are Jan de Boer, President of the CCU, and Henning

Højgaard Jensen, President of ISO/TC 12. Finally, I should like to thank Terry Quinn, Director of the BIPM, and his staff for the hospitality accorded to us during our work. Thank you very much. »

Prof. DE BOER thanked Mr Thor and asked that his statement should be included in the proceedings of the Conference.

### 18. Renewal of one half of the Comité International

As agreed, the order of the different items on the agenda was changed and the President asked Prof. Kovalevsky, Secretary of the CIPM and Secretary of the Conference, to deal with the renewal of one half of the CIPM and to explain the procedure to be followed.

Prof. KOVALEVSKY reminded delegations that as a result of four resignations since the last Conférence Générale, the CIPM had been obliged to coopt Messrs Clapham, Joshi, Lyons and Poustovoit. The election of these four members was subject to ratification by the Conférence Générale. In addition, to bring the number of members to be elected or re-elected up to nine, five names had been drawn during the session of the CIPM which had taken place on the 26 and 27 September 1991. This draw had designated Messrs Blevin, de Boer, Preston-Thomas, Skákala and Wang Daheng, bringing to nine the number of members to be elected by the Conférence Générale.

The proceedings then continued with a secret ballot by member state, each head of delegation placing his voting paper in the ballot box. The votes were counted by Mr Blouet (France), Mr Birkeland (Norway) and Dr Quinn (BIPM). After an interval of some five minutes the result was announced. Thirty-eight votes had been cast.

W. R. BLEVIN .....	38
J. DE BOER .....	37
P. B. CLAPHAM .....	38
S. K. JOSHI .....	38
J. W. LYONS .....	38
V. I. POUSTOVOIT .....	36
H. PRESTON-THOMAS ....	38
J. SKÁKALA .....	35
WANG DAHENG .....	38

All the members proposed by the Comité International were elected or re-elected. No additional names were proposed. (*Applause.*)

### 15. Programme of future work at the BIPM

The PRESIDENT asked Dr QUINN (BIPM) to present the programme of work at the BIPM for the four years 1993-1996.

Firstly, Dr QUINN stressed once again that the BIPM is a scientific laboratory, but it is a small one, with a scientific staff of some 25 members. This scientific

staff is divided into six sections, corresponding to the six fields of work. It may be said that for each section the work is divided into three categories: (1) international comparisons; (2) standards; and (3) research. The aim of this research is to support work in the first two categories and to maintain the expertise of the physicists involved.

As far as international comparisons are concerned, in the field of *length*, for example, the BIPM carries out comparisons of the wavelength of stabilized lasers, especially iodine-stabilized lasers. In the field of *mass*, the BIPM is responsible for the dissemination of the unit of mass. To this end it carries out verifications like the one currently under way. In the field of *time*, time comparisons, even though not carried out at the BIPM, have enabled TAI and UTC to be established and disseminated. The situation as regards *electricity* has considerably evolved. Standard cells were formerly brought to the BIPM and subjected to large-scale comparisons. Today techniques have greatly changed. Since the introduction of Josephson junction networks, for example, it is no longer necessary to carry out major regular comparisons as most of the national laboratories are equipped to maintain their own standards with good long-term stability. However, even if the type of work has changed, the volume of verification work has not lessened. For the constants on which the realization of the units is now based, it is necessary not only to ensure that the value accepted is correctly obtained, but also to verify all the electronics used in the course of the realizations.

The situation is somewhat similar as regards *photometry* and *radiometry*. The emphasis is less on photometry than it was in the past and the BIPM must develop its potential to carry out detector comparisons.

In the field of *ionizing radiations*, dosimetric comparisons of X-rays must continue. The BIPM has moreover undertaken to extend the International Reference System (SIR) for measuring the activity of  $\gamma$ -ray emitters, and must pursue this line of work.

As regards calibration, the situation differs from one field to another. In *length*, calibrations are carried out both for line scales of 1 m and standard end-gauges. In *mass*, the main role of the BIPM is to verify the prototypes of the kilogram in platinum-iridium. However, the BIPM also calibrates 1 kg mass standards in stainless steel. In the field of *time*, although no calibration service exists as such, the calibration of Global Positioning System (GPS) receivers carried out from time to time by BIPM staff in a number of laboratories should be mentioned. In *electricity*, despite the changes which have occurred, the BIPM is still asked to calibrate standard cells and 1  $\Omega$  resistance standards. In *radiometry*, the BIPM does not currently carry out any calibrations, but still calibrates photometric standard lamps. Finally, in the field of *ionizing radiations*, calibrations of ionization chambers, for example, are currently under way.

Lastly, Dr QUINN addressed the third type of activity: research and development. In the field of *length*, to refine and improve the work on lasers

it is important to develop understanding of the physical processes which occur in a laser when the frequency is stabilized by iodine, methane or carbon dioxide. As regards *mass*, it is important to study surface effects on platinum-iridium prototypes. It is, for example, necessary to do research on the physics and chemistry of surfaces. For work in this field the BIPM needs balances. Studies on balances are therefore required. These also make it possible to follow the short-term fluctuations which take place in mass standards. In the field of *time*, it is imperative to work on the algorithms used in the calculation of TAI. Also, as the precision of time scales increases, we encounter problems concerning the effects of relativity; it is thus becoming necessary to improve our understanding of them. In *electricity*, it is appropriate to study new methods of using the Josephson effect and the quantum-Hall effect. The potential use of transfer standards must also be examined. Advanced research on the properties of superconductors could have repercussions in metrology; these must be explored. In *radiometry*, the study of photoelectric cells for comparisons must be developed. The use of cryogenic radiometry and possible interest in a cryogenic radiometer must also be envisaged. In the field of *ionizing radiations*, the development of calorimetry and the extension of the SIR must be followed up, without prejudice to the long-term programme of counting statistics. Although some years ago it was decided to stop all new work in thermometry, the BIPM must retain the capability to provide the measurements required by its laboratories in the associated field of ambient temperature and in measurements of pressure at about atmospheric pressure. A workshop capable of responding to particular needs for equipment and installations is also required. Such a workshop must be up to date and equipped with numerically-controlled machines. Finally, as all the sections require computers at various stages of their work, and specifically for the automation of measurements, computer hardware and software must be continually modernized. One final preoccupation of the laboratories is the need for stable temperature and humidity. To this end, the BIPM is running a long-term laboratory air-conditioning programme. It is also imperative for physicists to have access to an adequate library containing all the documentation and information they may require. A final point to be mentioned is publications: the BIPM must publish the results of its work. A major effort in this direction has been made in recent years.

To close his address Dr QUINN emphasized that in respect of the work reviewed, although the BIPM is a small laboratory, the work it carries out must be at the same level as that of the large national laboratories. Responsibility for programme choices between meetings of the Conférence Générale lies with the CIPM. It is essential that the scientific staff of the BIPM should be highly qualified and motivated. They must, of course, have access to the equipment necessary to carry out their work, but they must also feel that they enjoy the support of those who are paying, i.e. the member states of the Convention du Mètre. They must therefore feel that they have the support of the Conférence Générale and of the CIPM. Dr Quinn had the impression that this was indeed the case.

Prof. MARÉCHAL thanked Dr Quinn for the lucidity of his address and the conviction and enthusiasm with which he had delivered it. He asked for any comments from the delegations.

Dr VANIER (Canada) congratulated the Director on the presentation of his programme. He mentioned in particular the three categories of work discussed by Dr Quinn. He thought that they diverged a little from the general mission of the BIPM. Dr Vanier would have liked to see a clear statement of the exact mission of the Bureau. He would also have appreciated some indication of the divisions between these three categories of activity. In his opinion, such information would be of interest to all the delegations.

Dr QUINN felt that the answers to these questions could be found in the report of the President of the CIPM. As far as the role of the BIPM is concerned, the reply is clear : it is defined by the Convention du Mètre. It is true that this treaty was drawn up in 1875. Many things have changed. It follows that the role of the BIPM has evolved over the years. At its 1984 meeting (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1984, 52, p. 7) the CIPM discussed the role of the BIPM in the 1980s and its conclusions were made known in the Convocation to the 18th Conférence Générale (*BIPM Comptes Rendus 18<sup>e</sup> Conf. Gén. Poids et Mesures*, 1987, p. 23), in the following terms :

« The purpose of the BIPM is to provide the physical basis necessary to ensure worldwide uniformity of measurements. Therefore, its principal tasks are :

- to conserve and disseminate the unit of mass ;
- to establish and disseminate the International Atomic Time and, in collaboration with the appropriate astronomical organizations, Universal Coordinated Time ;
- to provide a centre for the international comparison of the realizations of other base or derived units and for further dissemination of these units, as may be necessary to meet the needs of the ensemble of national metrological laboratories. This requires, among other things, that in some areas the BIPM maintains its own realizations of certain base or derived units ;
- to determine, when it may be appropriate, physical constants closely related to the definition, realization or dissemination of base or derived units ;
- to provide the scientific and administrative Secretariat for the Conférence Générale des Poids et Mesures, the Comité International des Poids et Mesures and its Comités Consultatifs ;
- to furnish whatever help is possible in the organization of those international comparisons which, although not carried out at the BIPM, are carried out under the auspices of a Comité Consultatif ;
- to ensure that the results of international comparisons are properly documented and, if not published elsewhere, are published directly by the BIPM.

In order to carry out these tasks efficiently and at the level required of it, the BIPM must have appropriate scientific, technical and administrative staff together with up-to-date equipment, laboratories, library, workshop and other facilities. »

Dr VANIER repeated that he would like to see the Bureau's own role redefined. He wondered if it would be possible to evaluate, for example, the

portion of work devoted to each of the three directions. He would like to have the views of the other delegations as to their interest in the subject.

Dr QUINN said that it is difficult to give a general reply. In certain fields, the BIPM had formerly made a particular effort as regards international comparisons, while in other fields the rapid evolution of physics had led to the intensification of research on the metrological applications. A certain flexibility must be maintained, and the effort put into the different types of activity must be adjusted to take account of the requirements of national laboratories. If these are to be adequately met, it is more realistic to keep an element of flexibility.

Dr VANIER said he was pleased to hear the key word, flexibility. It seemed all-important to him that the BIPM should remain at the service of the member countries of the Convention du Mètre.

Dr QUINN recalled that the objective is to provide member states with the bases for their national metrology.

The PRESIDENT closed the discussion by remarking that the proposed programme seemed to him to be well adapted to this objective.

Dr BLEVIN (Australia) wished to add a comment on Dr Quinn's presentation of the programme of future work. In his opinion, a useful way for a laboratory to appreciate the quality of work at the BIPM is to recall how often it applies to the organization for advice or assistance. As the director of a national laboratory, Dr Blevin applies to the BIPM when appropriate. He feels that the BIPM is often the best place to go for advice. This is as it should be. Modern research should thus be carried on at the BIPM but the know-how and experience of the past should also be conserved. Speaking as President of the CCPR, Dr Blevin mentioned that the BIPM had been somewhat overtaken by recent events in this field. He was pleased to note that this situation has been largely rectified, that the work of the BIPM has now attained a high standard, and that it is not content to follow but envisages an active role. Dr Blevin said he was happy to testify to this.

Prof. MARÉCHAL thanked Dr Blevin for his remarks. As no other delegate asked to speak on the programme of future work at the BIPM, the President moved to the next item on the agenda.

## **16. Annual dotation to the BIPM**

Dr PRESTON-THOMAS was asked to present the report of the Working Group on the dotation to the BIPM for the four years 1993-1996. He read the following report :

« The Working Group included the delegations of the following countries : Canada, China (People's Rep. of), Czechoslovakia, Denmark, France, Germany, Japan, Mexico, Spain, United Kingdom, USA and USSR.

The President invited each delegation of the Working Group to express its opinion on the proposal of the CIPM for the dotation to be voted by the 19th Conférence Générale.

The Working Group noted that the information on which the CIPM based its figure of 5 % per annum for the expected rate of price increase in France has been superseded. The more recent data based upon the official index for international organizations based in France suggests that a figure of 4 % is a more probable one. This was agreed by all members of the Working Group.

There then followed a considerable discussion, during which diverse points of view were expressed, on the proposal by the CIPM that the recent unexpected increase in the work required of the Time Section called for an increase of 625 000 gold francs in the base figure used for the calculation of the dotation. Although some delegations supported this proposal, the majority were of the opinion that the funds necessary for the work on time should be found without such a step increase.

It was agreed that a sophistication factor was essential to take account of the cost increases arising from the increasing complexity of equipment, modernization of buildings and increases in staff qualifications. Although a figure of about 3 % was thought to be desirable the general conclusion was that a figure in the range from 2 % to 3 % would be both necessary and practicable.

During the discussion a number of delegations expressed their appreciation of the quality of the work carried out at the BIPM. In particular, strong support was expressed for the work being carried out by the Time Section.

It was noted by the Working Group that the base figure used by the CIPM in the calculation of the proposed dotation has been reduced by 1.26 % as a result of the disappearance of the German Democratic Republic and the adhesion of New Zealand.

Taking into account the above considerations and also the budgetary restrictions facing some countries, the Working Group agreed that the dotation should be based upon the figures of 4 % for price increases and 2 % for sophistication. This total of 6 % results in the following figures :

1993	21 761 000	gold francs
1994	23 067 000	gold francs
1995	24 451 000	gold francs
1996	25 918 000	gold francs. »

The report concluded, the PRESIDENT thanked the Working Group for its first proposal. He stressed the importance of these financial matters and noted the importance of discussing them frankly. He asked for immediate reactions from Conference delegates.

Prof. KOVALEVSKY remarked that the Conference must vote on the Working Group's proposal at the next session, due to take place the following day, Thursday 3 October 1991. He joined the President in saying that he would like to hear the initial reactions of the different delegations. These would enable him, as Secretary of the Conference, to consider the best way to organize the discussion before the final vote.

Prof. MARÉCHAL repeated that he thought it a good idea for each delegation to make known any objections of principle or particular difficulties.

As no delegate asked to speak, Prof. KOVALEVSKY suggested proceeding to a trial vote, i.e. each delegation would be asked to say how it would vote if the question was raised. He emphasized that the dotations proposed by the *ad hoc* Working Group were smaller than those proposed by the CIPM for the years in question.

Before the trial vote, the President asked if any delegate objected to proceeding in this way. As no objections were raised the trial vote took place delegation by delegation. It resulted in four abstentions.

The session closed at 16 h 55.

\*  
\* \*

At 18 h 30 delegates and their spouses were invited by the Danish National Agency of Industry and Trade and the Danish Institute of Fundamental Metrology to a reception given in the apartment of His Excellency the Danish Ambassador in the Avenue Marceau, Paris 16<sup>e</sup>.

---



---

FOURTH SESSION  
OF THE 19th CONFÉRENCE GÉNÉRALE  
DES POIDS ET MESURES

Thursday 3 October 1991, 15 h 10

---

9, 10, 11, 14. The PRESIDENT opened the session by welcoming delegates and reminding them that the day's agenda included a vote on the scientific resolutions, whose drafts had already been presented in the reports of the Presidents of the Comités Consultatifs concerned, and a vote on the dotation to the BIPM for the four years 1993-1996.

Prof. MARÉCHAL asked if, since the previous session, any delegation had comments or questions concerning the annual dotation. Dr VANIER (Canada) wished to speak but asked whether he should do so immediately or wait until the final vote and speak in justification of his vote. Prof. MARÉCHAL replied that it would be preferable to hear at once any comment that Dr Vanier wished to make.

Dr VANIER replied that his remarks followed from his statement the previous day.

The PRESIDENT asked whether, subsequent to the trial vote that had taken place the day before, any delegation that had abstained now wished to change its position and vote negative.

Prof. BRAY (Italy) presented apologies on behalf of the head of the Italian delegation, who was delayed. He asked whether, in view of this, the Conference could defer the vote on the dotation and begin by voting on the scientific resolutions.

Prof. KOVALEVSKY thus proceeded to voting by delegation on the scientific resolutions. Draft Resolution A, concerning time and time comparisons, was read. It was adopted as Resolution 1 by 36 votes for and 1 abstention.

Dr VANIER remarked that Canada had in the past made many contributions to the establishment of time scales. If the necessary funds are supplied to his laboratory by his government, he intends to make a particular effort in this field.

Prof. KOVALEVSKY read Draft Resolution B on the Josephson and quantum-Hall effects. It was adopted as Resolution 2 by 37 votes for and 1 abstention.

He then read Draft Resolution C on the International Temperature Scale of 1990 and future work in thermometry. It was adopted as Resolution 3 by 37 votes for and 1 abstention.

Draft Resolution D on the SI prefixes zetta, zepto, yotta and yocto was read, and adopted as Resolution 4 by 37 votes for and 1 abstention.

As all the scientific resolutions had been adopted and the head of the Italian delegation had arrived, the PRESIDENT returned to the question of the annual dotation to the BIPM.

Dr VANIER (Canada) then made the following statement :

« The Canadian delegation wishes to congratulate the staff of the BIPM for their excellent work during the period since the last CGPM. We wish also to congratulate the Director of the BIPM who has managed the Bureau in a most competent and professional manner and to commend him for the dynamism he has created around himself, as evidenced by the activities of his staff. In this period, during which important changes have taken place in the implementation of standards in realizing the SI units, especially in the field of length and electrical standards, the staff of the Bureau has responded fully to the needs of the international community.

« We concur entirely with the international community in regard to the importance of the field of measurement science in the modern industrialized world. In this context, the BIPM plays an essential role in unifying physical measurements on a worldwide basis, and in this way serving the countries adhering to the Convention du Mètre.

« However, many adhering countries, including Canada, have seen a change in their science and technology agenda due in part to recent financial difficulties at the national level. These difficulties have also been felt by national institutions which have had severe restrictions imposed on the growth of their own activities and budgets. These institutions in some cases are associated very closely to the BIPM and directly provide the national share of the BIPM dotation.

« In the dotation proposed by the CIPM there is a request for an increase of 6 % per year for the next four years. Although we are fully aware that the added funds would be used for some valuable projects which deserve extra funding, the increase is not compatible with the restraints that we are facing. Consequently, although we are fully supportive of the BIPM as a whole and of its management by the Director, we feel we must abstain in the vote on the dotation. »

Prof. KOVALEVSKY summed up by saying that it was time to vote on the report of the *ad hoc* Working Group which had been read to the Conference during the session of Wednesday 2 October and for which ample time had

been given for reflection and discussion. The vote concerned the acceptance of the report, but this amounted to accepting the increase in the dotation to the BIPM given by the figures in the report. He reminded the Conference that this increase was based upon a rate of 4 % for inflation and 2 % for modernization, making a total of 6 %. He made it clear that a definitive vote would now take place and called each delegation in turn. The result of the vote was :

number of votes : 38

for : 34

abstentions : 4 (Argentina, Canada, India, Indonesia).

The report of the *ad hoc* Working Group was then adopted, with the result that the fixed part of the annual funding of the BIPM will be increased in such a way that the sum of the fixed part and the supplementary part (defined in Article 6 (1921) of the Rules Appended to the Convention du Mètre of 1875) be, for the states subscribing to the Convention at the time of the 19th Conférence Générale des Poids et Mesures, raised to

1993	21 761 000	gold francs
1994	23 067 000	gold francs
1995	24 451 000	gold francs
1996	25 918 000	gold francs.

## 17. Proposals from Delegates

The PRESIDENT confirms that no proposal has been received by the Comité International to be submitted before the Conférence Générale.

## 19. Other business

MR DRĂGULĂNESCU, head of the Romanian delegation, proposed that a Working Group be set up, in the context of the activities of the BIPM, to respond to the needs of developing countries. These needs are at two levels: some are purely metrological, but there is an additional and greater need for information. He would like to see the BIPM participate more extensively here, to the benefit of all countries, as there is much to be done. The proposed Working Group should make recommendations concerning the organization of national metrology laboratories, several approaches being possible. These recommendations might concern, for example, basic equipment and the minimum grant required to run such a laboratory. The Working Group should also publish specialized bibliographies on the methods and practical procedures to be followed in the maintenance and dissemination of units of measurement.

Prof. KIND, President of the CIPM, replied that it is difficult to give an immediate reply to such a question, this kind of activity not being the primary role of the BIPM. It is virtually impossible to maintain the highest level of accuracy in standards while at the same time providing services on a large

scale. However, the CIPM will consider the problem and put it on the agenda for the next meeting. He will inform the Romanian delegation of the outcome of the discussion.

Dr QUINN said that his first reaction was similar to that of Prof. Kind. He felt that the BIPM should do rather more for developing countries. With this in mind, he is attempting to circulate existing knowledge and techniques as widely as possible. Taking the example of temperature measurement, he recalled that the Comité Consultatif de Thermométrie has prepared and published a document on secondary realizations of the ITS-90. This is precisely the kind of information that would be of help to developing countries. Dr QUINN took careful note of the Romanian delegation's request.

Prof. MARÉCHAL saw a certain danger in responding in too direct a fashion to the request from Romania. He feared that making recommendations on the setting up and funding of a national laboratory might lead some governments to misinterpret the intentions of the BIPM and so to imagine that it is seeking to impose its will on them.

Dr BLEVIN drew attention to the aid already given by certain developed countries to the developing countries. This aid allows the developing countries, albeit in an indirect way, to be in contact with the activities of the BIPM at the highest level. Furthermore, he emphasized that *Metrologia* is moving in this direction since the journal now welcomes articles whose content is at a more practical level, not calling for the highest accuracy that can be attained in metrology. Dr Blevin agreed that the question raised by the Romanian delegation should be considered by the CIPM.

Dr VANIER (Canada) wondered whether the question was being asked in the appropriate place. In his opinion, other organizations should be addressed on these matters. As far as he was concerned, Canada already gives aid to less developed countries by, for example, sending technicians to teach specific skills.

Dr LYONS agreed that the organs of the Convention du Mètre are not those that should be addressed regarding aid to developing countries. The problems of these countries are much wider and are principally problems of training, lying outside the competence of the Conférence Générale des Poids et Mesures.

Prof. KIND concluded by saying that the BIPM must be sensitive to the needs of all countries in matters of metrology, but it is the responsibility of governments to be aware of the importance of metrology in many sectors of activity, both commercial and industrial. The role of the organs of the Convention du Mètre is perhaps to help governments become aware of the importance of metrology. On the other hand, he feared that to try and take a more active part in the solution of these problems would result in a heavy load being placed upon the budget of the BIPM.

Dr MOSCATI (Brazil) expressed the wish that *Metrologia* would publish information on meetings, specialist sessions and publications concerning metrology. To find such information is especially difficult in Brazil.

Mr BLOUET (France) remarked that several of the questions raised merit further study and a reply at some later date. He suggested that, before the next Conference, the CIPM ask member nations what they expect from the organs of the Convention du Mètre. The results of this inquiry would show what could or could not be done.

Prof. KIND thanked Mr Blouet for his suggestion and promised that it would be noted in the preparation of the next Conférence Générale.

Prof. MARÉCHAL thought this an important subject for the future policy of the BIPM.

Prof. KIND said that, as the last item on the agenda had been dealt with, the work of the Conférence Générale was drawing to a close. He thanked Prof. Maréchal for the firm but flexible manner in which he had led the debates. (*Applause*).

Prof. MARÉCHAL thanked Prof. Kind for the compliment, saying that if he had been able to maintain a certain flexibility it was thanks to everyone present. A large part of the credit must go to those responsible for the preparation of the Conference, in particular Prof. Kind, Prof. Kovalevsky, Dr Quinn. He also wished to thank those who had worked with great diplomacy in the *ad hoc* Working Group on financial matters. (*Applause*).

The session closed at 16 h 50.

\*  
\* \*

At 18 h 30 the heads of delegations to the Conférence Générale were invited by His Excellency the German Ambassador to a reception given at the Palais Beauharnais, on the occasion of the celebration of a united Germany.

---



---

**RESOLUTIONS**  
**ADOPTED BY THE 19th CONFÉRENCE GÉNÉRALE \***

---

**Time standards and time comparisons**

RESOLUTION 1

The 19th Conférence Générale des Poids et Mesures,

*noting* that the accuracy of clock comparisons has been greatly improved by the use of satellite techniques,

*remarks* that this accuracy

— can be further improved by the better use of the satellite techniques already developed,

— reveals the differences and systematic variations among atomic frequency standards,

— allows a better synchronization of national time scales,

*recommends*

— the construction of new primary caesium standards, the improvement of the frequency accuracy of existing primary standards and the study of the systematic differences in frequency which exist between them,

— that the laboratories participating in International Atomic Time (TAI) stabilize the environmental conditions of each contributing clock, keep careful records of these environmental conditions and report them to the BIPM,

— that the coordinates adopted for antennas used in single-way time comparison by satellite techniques correspond to their real position in the terrestrial reference system of the International Earth Rotation Service.

---

\* For the BIPM notation see page 179.

## The Josephson and quantum-Hall effects

### RESOLUTION 2

The 19th Conférence Générale des Poids et Mesures,

*considering*

— that worldwide uniformity and long-term stability of the national representations of electrical units are of great importance for science, industry and commerce for both technical and economic reasons,

— that many national laboratories now use the Josephson and quantum-Hall effects for the conservation of their representations of the volt and the ohm respectively, a practice giving complete security in terms of long-term stability,

— that the values attributed to their representations should be in as close as possible agreement with the SI,

*recalling* Resolution 6 of the 18th Conférence Générale concerning adjustments then foreseen in representations of the volt and the ohm,

*noting* the decisions made by the Comité International des Poids et Mesures in 1988, during its 77th Meeting concerning these adjustments, in particular the conventional values  $K_{J,90}$  (equal to 483 597,9 GHz/V) and  $R_{K,90}$  (equal to 25 812,807  $\Omega$ ) attributed to the Josephson constant  $K_J$  and the von Klitzing constant  $R_K$  used in representations of the volt and the ohm respectively,

*recommends*

— that national laboratories continue their efforts to reduce the uncertainty in the knowledge of the ratios  $K_{J,90}/K_J$  and  $R_{K,90}/R_K$ ,

— that research be continued into the basic theory of the Josephson and quantum-Hall effects.

**The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) and future work in thermometry****RESOLUTION 3**

The 19th Conférence Générale des Poids et Mesures,

*considering*

— that worldwide uniformity and long-term stability in the measurement of temperature are of great importance for science, industry and commerce for both technical and economic reasons,

— that the international temperature scale should be as close as possible to thermodynamic temperature,

*noting*

— that the 18th Conférence Générale in its Resolution 7 had invited the Comité International des Poids et Mesures and national laboratories to prepare and adopt a new international scale to replace the International Practical Temperature Scale of 1968, by then known to differ significantly from thermodynamic temperatures,

— that the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) adopted by the Comité International in 1989 at its 78th Meeting is generally more precise, more readily realized and more nearly in accord with thermodynamic temperatures, and that it fulfills the requirements demanded of it by Resolution 7 of the 18th Conférence Générale,

*recommends* that national laboratories continue their efforts to improve the worldwide uniformity and long-term stability in the measurement of temperature by the rapid implementation of the ITS-90 and the maintenance of research programmes on fundamental thermometry.

**SI prefixes zetta, zepto, yotta and yocto****RESOLUTION 4**

The 19th Conférence Générale des Poids et Mesures

*decides* to add to the list of SI prefixes to be used for multiples and submultiples of units, adopted by the 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), Resolution 12, paragraph 3, the 12th CGPM, Resolution 8 and the 15th CGPM, Resolution 10, the following prefixes :

Multiplying factor	Prefix	Symbol
$10^{21}$	zetta	Z
$10^{-21}$	zepto	z
$10^{24}$	yotta	Y
$10^{-24}$	yocto	y

---



---

## TABLE DES MATIÈRES

---

Comptes rendus des Séances  
de la 19<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures  
réunie à Paris en 1991

(Les numéros se rapportent aux différents points de l'Ordre du jour)

Liste des délégués et des invités .....	5
Convocation à la Conférence et commentaires sur les principaux éléments du programme.	13
Ordre du jour de la Conférence .....	24
<b>Première séance, lundi 30 septembre 1991</b>	
Discours d'ouverture de M. H. Curien, ministre français de la Recherche et de la Technologie .....	25
Réponse de M. D. Kind .....	26
Allocution de M. J. Hamburger, président de la Conférence (la présidence est ensuite confiée à M. A. Maréchal) .....	27
2, 3, 4. Désignation de M. J. Kovalevsky comme secrétaire de la Conférence. Établissement de la liste des délégués chargés du vote, par État .....	30
5. Approbation de l'ordre du jour .....	31
6. Rapport du président du Comité international sur les travaux accomplis depuis la 18 <sup>e</sup> Conférence générale (octobre 1987-septembre 1991) (Comité international; comités consultatifs; travaux du BIPM) .....	31
Constitution d'un « Groupe de travail pour la dotation du BIPM » .....	46
<b>Deuxième séance, lundi 30 septembre 1991</b>	
7. Longueur et définition du mètre .....	47
Rapport du président du Comité consultatif pour la définition du mètre (progrès obtenus dans les chaînes de fréquence des laboratoires nationaux et entre elles; le CIPM devra envisager de réviser la mise en pratique de la définition du mètre).	
8. Masse et grandeurs apparentées .....	49
Rapport du président du Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (état d'avancement de la troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme; mise à jour de la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air à partir de données récentes; balances) .....	49

9. La seconde et le Temps atomique international .....	55
Rapport du président du Comité consultatif pour la définition de la seconde (comparaisons des échelles de temps ; succès du transfert au BIPM des tâches de construction de l'échelle TAI) .....	55
10. Étalons électriques .....	58
Rapport du président <i>ad interim</i> du Comité consultatif d'électricité (adoption des valeurs convenues pour $K_{J,90}$ et $R_{K,90}$ ) .....	59
11. Température, Échelle internationale de température de 1990 .....	62
Rapport du président du Comité consultatif de thermométrie (adoption de l'EIT-90 ; rédaction de deux documents complémentaires) .....	62
12. Photométrie et radiométrie .....	66
Rapport du président du Comité consultatif de photométrie et radiométrie (problèmes posés par la métrologie des fibres optiques ; spectroradiométrie : avantages éventuels du synchrotron comme étalon primaire) .....	66
 <b>Visite du Bureau international des poids et mesures, mardi 1<sup>er</sup> octobre 1991</b>	
Visite du BIPM. Réception au Pavillon de Breteuil. Remise des insignes de chevalier de la Légion d'honneur à M. J. de Boer par M. le Professeur J. Hamburger .....	71
 <b>Troisième séance, mercredi 2 octobre 1991</b>	
13. Rayonnements ionisants .....	75
Rapport du président du Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants (élargissement de la composition du CCEMRI ; mise au point d'un étalon pour la mesure de l'équivalent de dose ambiant ; programme en cours de mesure calorimétrique ; extension du SIR) .....	75
14. Le Système international d'unités .....	78
Rapport du président du Comité consultatif des unités (6 <sup>e</sup> édition de la brochure sur le SI tenant compte des décisions relatives à la mise en pratique des unités électriques et l'entrée en vigueur de l'EIT-90 ; proposition de nouveaux préfixes). Intervention de M. J. Thor. en sa qualité de secrétaire de l'ISO TC 12. pour rendre hommage à la contribution apportée par M. J. de Boer et M. H. H. Jensen à la révision de la norme ISO 31 .....	78
18. Renouvellement par moitié du Comité international. Proposition du CIPM (liste des membres sortants ; les neuf membres sortants sont réélus) .....	81
15. Programme des travaux futurs du BIPM .....	82
Présentation du document « Programme de travail et budget du BIPM dans les quatre années 1993-1996 » .....	82
Discussion (rappel de la mission exacte du BIPM ; intervention de la délégation canadienne) .....	84
16. Dotation annuelle du BIPM (Rapport du Groupe de travail pour la dotation ; discussion ; vote indicatif) .....	86

**Quatrième séance, jeudi 3 octobre 1991**

Projets de résolution A, B, C, D ; suite des discussions et votes .....	89
A. Étalons de temps et comparaisons de temps : le projet est adopté (Résolution 1, p. 95) .....	89
B. L'effet Josephson et l'effet Hall quantique : le projet est adopté (Résolution 2, p. 96) .....	90
C. Échelle internationale de température de 1990 et travaux futurs en thermométrie : le projet est adopté (Résolution 3, p. 97) .....	90
D. Préfixes SI zetta, zepto, yotta et yocto : le projet est adopté (Résolution 4, p. 97) .....	90
Vote de la dotation du BIPM pour la période 1993-1996 .....	91
17. Propositions de MM. les Délégués .....	91
Aucune proposition n'a été reçue par le CIPM .....	91
19. Questions diverses .....	91
Proposition du chef de la délégation de Roumanie de créer au BIPM un groupe de travail chargé de répondre aux besoins spécifiques des pays en voie de développement. Aucune action n'est envisagée dans ce sens .....	91
Remerciements du président du CIPM et du président de la Conférence .....	93

**Texte des Résolutions adoptées**

— Étalons de temps et comparaisons de temps (invitation à construire de nouveaux étalons primaires à césium ; recommandation concernant les conditions d'installation et de fonctionnement des horloges qui contribuent au TAI et concernant les coordonnées d'antennes utilisées pour les comparaisons d'horloges par satellite) : Résolution 1 .....	95
— L'effet Josephson et l'effet Hall quantique (prise en compte des valeurs attribuées à ces constantes ; invitation à poursuivre les recherches dans ce domaine) : Résolution 2 .....	96
— L'Échelle internationale de température de 1990 et les travaux futurs en thermométrie (invitation à mettre en œuvre l'EIT-90 et poursuivre la recherche fondamentale en thermométrie) : Résolution 3 .....	97
— Préfixes SI zetta, zepto, yotta et yocto : Résolution 4 .....	97

**Proceedings**

Note on the use of the English text .....	99
Convocation and notes on the principal points of the agenda .....	101
Agenda .....	114

**First session, Monday 30 September 1991**

Opening address by Mr H. Curien, Ministre de la Recherche et de la Technologie ..	115
Reply by Prof. D. Kind .....	116
Address by Prof. J. Hamburger, President of the Académie des Sciences de Paris and President of the Conference (presidency is passed to Mr A. Maréchal) .....	117
2, 3, 4. Nomination of Prof. J. Kovalevsky as Secretary of the Conference. Establishment of the list of the delegates eligible to vote .....	119
5. Approval of the agenda .....	120

6. Report of the President of the Comité International des Poids et Mesures on the work accomplished since the 18th Conférence Générale (October 1987-September 1991) (Comité International: Consultative Committees; work of the BIPM) ...	120
Formation of the « Working Group on the dotation for the BIPM » .....	135
<b>Second session, Monday 30 September 1991</b>	
7. Length and the definition of the metre .....	137
Report of the President of the Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (improvement of the agreement between the values obtained by the frequency chains of the various national laboratories; envisaged revision by the CIPM of the « mise en pratique » of the definition of the metre) .....	137
8. Mass and related quantities .....	139
Report of the President of the Comité consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (progress report on the third periodic verification of the national prototypes of the kilogram; up-dating of the equation for the determination of the density of moist air; balances) .....	139
9. The second and International Atomic Time .....	144
Report of the President of the Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (comparison of time scales; success of the transfer of the establishment of the TAI scale to the BIPM) .....	144
10. Electrical standards .....	147
Report of the President <i>ad interim</i> of the Comité Consultatif d'Électricité (adoption of the conventional values $K_{J,90}$ and $R_{K,90}$ ) .....	147
11. Temperature, the International Temperature Scale of 1990 .....	151
Report of the President of the Comité Consultatif de Thermométrie (adoption of the ITS-90; publication of two supporting documents) .....	151
12. Photometry and radiometry .....	154
Report of the President of the Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (metrological requirements for optical-fibre technology; spectroradiometry; possible advantages of using synchrotron electron storage ring as the primary standard). .....	154
<b>Visit to the Bureau International des Poids et Mesures, Tuesday 1 October 1991</b>	
Visit to the BIPM. Reception at the Pavillon de Breteuil. Prof. J. de Boer is presented with the insignia of the Légion d'honneur by Prof. J. Hamburger .....	159
<b>Third session, Wednesday 2 October 1991</b>	
13. Ionizing radiations .....	163
Report of the President of the Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants (the membership of the CCEMRI is broadened; development of a reliable standard for the measurement of ambient dose equivalent; a programme of calorimetric measurement has just begun; extension of the SIR) .....	163

14. The International System of Units .....	166
Report of the President of the Comité Consultatif des Unités (6th edition of the SI brochure to include the decisions concerning the « mise en pratique » of electrical units and the adoption of ITS-90; proposal for new prefixes) .....	166
As Secretary of ISO/TC 12, Mr J. Thor thanks Prof. J. de Boer and Prof. H. H. Jensen for their contributions to the revision of ISO 31 .....	168
18. Renewal of one half of the Comité International. Proposal made by the CIPM. The nine outgoing members are re-elected .....	169
15. Programme of future work at the BIPM .....	169
Presentation of the document entitled « Programme of work and budget of the BIPM for the four years 1993-1996 » .....	169
Discussion (the role of the BIPM is recalled; intervention of the Canadian delegate) .....	172
16. Annual dotation to the BIPM (Report of the Working Group on the dotation; discussion; trial vote) .....	173
 <b>Fourth session, Thursday 3 October 1991</b>	
Draft Resolutions A, B, C, D; further discussion and votes .....	177
A. Time standards and time comparisons: the Draft Resolution is adopted (Resolution 1, p. 183) .....	177
B. The Josephson and quantum-Hall effects: the Draft Resolution is adopted (Resolution 2, p. 184) .....	178
C. The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) and future work in thermometry: the Draft Resolution is adopted (Resolution 3, p. 185) .....	178
D. SI prefixes zetta, zepto, yotta and yocto: the Draft Resolution is adopted (Resolution 4, p. 185) .....	178
The dotation to the BIPM for the four years 1993-1996 is agreed .....	179
17. Proposals from Delegates .....	179
No proposal was received .....	179
19. Other business .....	179
The head of the Romanian delegation proposes the setting up of a Working Group to respond to the needs of developing countries. No action is envisaged .....	179
The President of the CIPM and the President of the Conference thank everyone for the way discussions were prepared and conducted .....	181
 <b>Texts of the adopted Resolutions</b>	
— Time standards and time comparisons (the construction of new primary caesium standards is recommended; efforts to be made on the environmental conditions of clocks contributing to TAI and on the coordinates adopted for antennas used in time comparisons): Resolution 1 .....	183
— The Josephson and quantum-Hall effects (decisions made by the CIPM for the conventional values for these constants are noted; research work in the field should be continued): Resolution 2 .....	184
The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) and future work in thermometry (rapid implementation of ITS-90 is advised and research programmes on fundamental thermometry should be maintained): Resolution 3 .....	185
— SI prefixes zetta, zepto, yotta and yocto: Resolution 4 .....	185

IMPRIMERIE DURAND  
28600 LUISANT (FRANCE)

---

Dépôt légal : Imprimeur, 1992, n° 7913  
Achevé d'imprimer le 15 mai 1992  
ISBN 2-822-2122-9  
Imprimé en France