

**COMITÉ CONSULTATIF POUR LA MASSE  
ET LES GRANDEURS APPARENTÉES**

SESSION DE 1991  
MEETING OF 1991

---

---

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES



---

COMITÉ CONSULTATIF  
POUR LA MASSE  
ET LES GRANDEURS APPARENTÉES

Rapport de la 4<sup>e</sup> session  
Report of the 4th Meeting

1991

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

---

ISBN 92-822-2125-3  
ISSN 1016-3778

---

LISTE DES SIGLES UTILISÉS DANS LE PRÉSENT VOLUME  
LIST OF ACRONYMS USED IN THE PRESENT VOLUME

**Sigles des laboratoires, commissions et conférences**  
**Acronyms for laboratories, committees and conferences**

BIML	Bureau international de métrologie légale
BIPM	Bureau international des poids et mesures
BNM	Bureau national de métrologie, Paris (France)
CCM	Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées
CGPM	Conférence générale des poids et mesures
CIPM	Comité international des poids et mesures
CODATA	Committee on Data for Science and Technology
CPEM	Conference on Precision Electromagnetic Measurements
CSIRO	(ex NML) Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Division of Applied Physics, Lindfield (Australie)
CSMU	Československý Metrologický Ústav, Brastislava et Prague (Tchécoslovaquie)
EUROMET	European Collaboration on Measurement Standards
IMGC	Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Turin (Italie)
INM	Institut national de métrologie, Paris (France)
KRISS	(ex KSRI) Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon (Rép. de Corée)
*KSRI	Korea Standards Research Institute, Taejon (Rép. de Corée), voir KRISS
LNE	Laboratoire national d'essais, Paris (France)
*NBS	National Bureau of Standards, Gaithersburg (É.-U. d'Amérique), voir NIST
NIM	Institut national de métrologie/National Institute of Metrology, Beijing (Rép. pop. de Chine)
NIST	(ex NBS) National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg (É.-U. d'Amérique)
NPL	National Physical Laboratory, Teddington (Royaume-Uni)
NRC	Conseil national de recherches du Canada/National Research Council of Canada, Ottawa (Canada)
NRLM	National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba (Japon)
OFM	Office fédéral de métrologie, Wabern (Suisse)



PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig (Allemagne)
SP	Statens Provningsanstalt, Borås (Suède)
VNIIFTRI	Institut des mesures physico-techniques et radiotechniques/All Union Research Institute for Physical Technical and Radio-Technical Measurements, Moscou (URSS)
VNIIM	Institut de métrologie D.I. Mendéléev/D.I. Mendelejev Institute for Metrology, Leningrad (URSS)
VSL	Van Swinden Laboratorium, Delft (Pays-Bas)

## LE BIPM

### ET LA CONVENTION DU MÈTRE

Le Bureau international des poids et mesures (BIPM) a été créé par la Convention du Mètre signée à Paris le 20 mai 1875 par dix-sept États, lors de la dernière séance de la Conférence diplomatique du Mètre. Cette convention a été modifiée en 1921.

Le Bureau international a son siège près de Paris, dans le domaine (43 520 m<sup>2</sup>) du Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) mis à sa disposition par le Gouvernement français ; son entretien est assuré à frais communs par les États membres de la Convention du Mètre<sup>(1)</sup>.

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

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

Le Bureau international fonctionne sous la surveillance exclusive du Comité international des poids et mesures (CIPM), placé lui-même sous l'autorité de la Conférence générale des poids et mesures (CGPM).

La Conférence générale est formée des délégués de tous les États membres de la Convention du Mètre et se réunit actuellement tous les quatre ans. Elle reçoit à chacune de ses sessions le rapport du Comité international sur les travaux accomplis, et a pour mission :

- de discuter et de provoquer les mesures nécessaires pour assurer la propagation et le perfectionnement du Système international d'unités (SI), forme moderne du Système métrique ;
- de sanctionner les résultats des nouvelles déterminations métrologiques fondamentales et d'adopter les diverses résolutions scientifiques de portée internationale ;
- d'adopter les décisions importantes concernant l'organisation et le développement du Bureau international.

Le Comité international est composé de dix-huit membres appartenant à des États différents ; il se réunit actuellement tous les ans. Le bureau de ce Comité adresse aux Gouvernements des États membres de la Convention du Mètre un rapport annuel sur la situation administrative et financière du Bureau international.

Limitées à l'origine aux mesures de longueur et de masse et aux études métrologiques en relation avec ces grandeurs, les activités du Bureau international ont été étendues aux étalons de mesure électriques (1927), photométriques (1937), des rayonnements ionisants (1960) et aux échelles de temps (1988). Dans ce but, un agrandissement des premiers laboratoires construits en 1876-1878 a eu lieu en 1929 ; de nouveaux bâtiments ont été construits en 1963-1964 pour les laboratoires de la section des rayonnements ionisants, en 1984 pour le travail sur les lasers et en 1988 a été inauguré un bâtiment pour la bibliothèque et des bureaux.

(<sup>1</sup>) Au 31 décembre 1991, quarante-sept États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne, Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, Canada, Chili, Chine (Rép. pop. de), Corée (Rép. de), Corée (Rép. pop. dém. de), Danemark, Dominicaine (Rép.), Égypte, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran, Irlande, Israël, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Nouvelle-Zélande, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Venezuela, Yougoslavie.

Une quarantaine de physiciens ou techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau international. Ils y font principalement des recherches métrologiques, des comparaisons internationales des réalisations des unités et des vérifications d'étalons dans les domaines mentionnés ci-dessus. Ces travaux font l'objet d'un rapport annuel détaillé qui est publié avec les procès-verbaux des séances du Comité international.

Devant l'extension des tâches confiées au Bureau international, le Comité international a institué depuis 1927, sous le nom de comités consultatifs, des organes destinés à le renseigner sur les questions qu'il soumet, pour avis, à leur examen. Ces comités consultatifs, qui peuvent créer des groupes de travail temporaires ou permanents pour l'étude de sujets particuliers, sont chargés de coordonner les travaux internationaux effectués dans leurs domaines respectifs et de proposer des recommandations concernant les unités, en vue des décisions que le Comité international est amené à prendre directement ou à soumettre à la sanction de la Conférence générale pour assurer l'unification mondiale des unités de mesure.

Les comités consultatifs ont un règlement commun (*BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 31, 1963, p. 97). Chaque comité consultatif, dont la présidence est généralement confiée à un membre du Comité international, est composé de délégués de chacun des grands laboratoires de métrologie et des instituts spécialisés dont la liste est établie par le Comité international, de membres individuels désignés également par le Comité international et d'un représentant du Bureau international. Ces comités tiennent leurs sessions à des intervalles irréguliers ; ils sont actuellement au nombre de huit :

1. Le Comité consultatif d'électricité (CCE), créé en 1927.
2. Le Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR), nouveau nom donné en 1971 au Comité consultatif de photométrie (CCP) créé en 1933 (de 1930 à 1933 le Comité précédent (CCE) s'est occupé des questions de photométrie).
3. Le Comité consultatif de thermométrie (CCT), créé en 1937.
4. Le Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM), créé en 1952.
5. Le Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS), créé en 1956.
6. Le Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants (CCEMRI), créé en 1958. En 1969, ce comité consultatif a institué quatre sections : Section I (Rayons X et  $\gamma$ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie  $\alpha$ ) ; cette dernière section a été dissoute en 1975, son domaine d'activité étant confié à la Section II.
7. Le Comité consultatif des unités (CCU), créé en 1964 (ce comité consultatif a remplacé la « Commission du système d'unités » instituée par le CIPM en 1954).
8. Le Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM), créé en 1980.

Les travaux de la Conférence générale, du Comité international, des comités consultatifs et du Bureau international sont publiés par les soins de ce dernier dans les collections suivantes :

- *Comptes rendus des séances de la Conférence générale des poids et mesures* ;
- *Procès-verbaux des séances du Comité international des poids et mesures* ;
- *Sessions des comités consultatifs* ;
- *Recueil de travaux du Bureau international des poids et mesures* (ce recueil hors commerce rassemble les articles publiés dans des revues et ouvrages scientifiques et techniques, ainsi que certains travaux publiés sous forme de rapports multicopiés).

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

La collection des *Travaux et mémoires du Bureau international des poids et mesures* (22 tomes publiés de 1881 à 1966) a été arrêtée en 1966 par décision du Comité international.

Depuis 1965 la revue internationale *Metrologia*, éditée sous les auspices du Comité international des poids et mesures, publie des articles sur les principaux travaux de métrologie scientifique effectués dans le monde, sur l'amélioration des méthodes de mesure et des étalons, sur les unités, etc., ainsi que des rapports concernant les activités, les décisions et les recommandations des organes de la Convention du Mètre.

## Comité international des poids et mesures

*Secrétaire*  
J. Kovalevsky

*Président*  
D. Kind

### LISTE DES MEMBRES DU COMITÉ CONSULTATIF POUR LA MASSE ET LES GRANDEURS APPARENTÉES

*Président*

A. BRAY, membre du Comité international des poids et mesures, Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Turin.

*Membres*

BUREAU NATIONAL DE MÉTROLOGIE, Paris : Institut national de métrologie [INM] du Conservatoire national des arts et métiers, Paris.

ČESKOSLOVENSKÝ METROLOGICKÝ ÚSTAV [CSMU], Bratislava.

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

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield.

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

INSTITUT NATIONAL DE MÉTROLOGIE [NIM], Beijing.

ISTITUTO DI METROLOGIA G. COLONNETTI [IMGCI], Turin.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY [NIST], Gaithersburg.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [NPL], Teddington.

OFFICE FÉDÉRAL DE MÉTROLOGIE [OFM], Wabern.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [PTB], Braunschweig et Berlin.

VAN SWINDEN LABORATORIUM [VSL], Delft.

Le directeur du Bureau international des poids et mesures [BIPM],  
Sèvres.

---

ORDRE DU JOUR  
de la 4<sup>e</sup> session

1. Ouverture de la session.
2. Désignation d'un rapporteur.
3. Approbation de l'ordre du jour.
4. Troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme.
5. Rapports des groupes de travail Masse
  - a) Étalons de masse,
  - b) Masse volumique.
6. Rapport du groupe de travail Force.
7. Rapports des groupes de travail Pression
  - a) Hautes pressions,
  - b) Moyennes pressions,
  - c) Basses pressions,
  - d) Très basses pressions.
8. Études concernant les balances prototypes.
9. État actuel et travaux futurs concernant une possible nouvelle définition du kilogramme.
10. Composition des groupes de travail.
11. Divers
  - a) Rapport au CIPM et Recommandations,
  - b) Prochaine réunion,
  - c) Questions diverses.

---

RAPPORT  
DU  
COMITÉ CONSULTATIF  
POUR LA MASSE ET LES GRANDEURS APPARENTÉES  
(4<sup>e</sup> session — 1991)  
AU  
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES  
par R. S. DAVIS, rapporteur

---

Le Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM) a tenu sa quatrième session au Bureau international des poids et mesures, à Sèvres, le jeudi 30 et le vendredi 31 mai 1991.

Étaient présents :

A. BRAY, membre du CIPM, président du CCM.

Les délégués des laboratoires membres :

Bureau national de métrologie, Paris : Institut national de métrologie [INM] du Conservatoire national des arts et métiers, Paris (C. MORILLON).

Československý Metrologický Ústav [CSMU], Bratislava (R. SPURNÝ).

Conseil national de recherches du Canada [NRC], Ottawa (G. D. CHAPMAN).

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield (E. C. MORRIS).

Institut de métrologie D. I. Mendéléev [VNIIM], Leningrad (A. P. SCHELKINE).

Institut national de métrologie [NIM], Beijing (Changyan SHI, Ruixian SUN).

Istituto di Metrologia G. Colonnetti [IMGCI], Turin (M. PLASSA, G. MOLINAR).

National Institute of Standards and Technology [NIST], Gaithersburg (R. S. DAVIS, C. R. TILFORD).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (R. WILSON, P. R. STUART).

National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Tsukuba (R. MASUI).

Office fédéral de métrologie [OFM], Wabern (W. BEER).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig et Berlin (M. GLÄSER, M. PETERS, N. KAISER).

Van Swinden Laboratorium [VSL], Delft (R. MUIJLWIJK).

Le directeur du Bureau international des poids et mesures [BIPM] (T. J. QUINN).

Invités :

L. R. PENDRILL, Statens Provningsanstalt [SP], Borås.

Korea Standards Research Institute [KSRI], Taejon (Kwang-Hua CHUNG, Jin-Yeol Do).

Assistaient aussi à la session :

Bureau international de métrologie légale [BIML] (Å. THULIN) (observateur).

P. GIACOMO, directeur honoraire du BIPM; J. BONHOURE, M.-J. COARASA, G. GIRARD et A. PICARD [BIPM].

## 1. Ouverture de la session

Le président ouvre la session et souhaite la bienvenue aux participants. Il présente les délégués, les invités et les autres personnes présentes. M. Davis est nommé rapporteur. Après avoir informé les participants que le Groupe de travail sur les très basses pressions ne présentera pas de rapport au CCM, le président demande aux membres de ce groupe de travail et à ceux du Groupe de travail sur les basses pressions de discuter, entre les séances, de la possibilité de fusionner ces deux groupes. L'ordre du jour est approuvé.

## 2. Troisième vérification périodique des prototypes nationaux

Le président demande à M. Girard de présenter son rapport sur la troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme. M. Girard explique tout d'abord que la troisième vérification s'effectue en deux étapes. La première, terminée, comprenait l'étude des effets du nettoyage-lavage sur le prototype international et ses six témoins, et la comparaison de la masse du prototype international à celle de ses

témoins. Ce travail a été décrit dans le document CCM/91-3 et dans le rapport de la réunion *ad hoc* du Groupe de travail sur les étalons de masse qui s'est tenue les 2 et 3 novembre 1989 au BIPM. La deuxième étape concerne la vérification proprement dite des prototypes nationaux. Ce travail, qui n'est pas encore terminé, progresse. Les résultats préliminaires sont donnés dans le document CCM/91-20.

*Effets du nettoyage-lavage sur le prototype international, les six témoins et d'autres prototypes*

Pour donner une description complète du déroulement de la troisième vérification, M. Girard présente d'abord un bref résumé des résultats de la première étape. Il a été non seulement procédé à l'étude du prototype international et de ses six témoins, mais aussi à celle des prototypes d'usage n<sup>os</sup> 25, 9, et 31 du BIPM. Le prototype n<sup>o</sup> 25 (d'usage exceptionnel) est d'une qualité équivalente à celle des témoins mais, comme ce n'est pas un témoin officiel, il peut être utilisé occasionnellement par le BIPM. Les deux autres prototypes, n<sup>os</sup> 9 et 31, sont conservés dans le laboratoire des masses du BIPM et servent de prototypes d'usage courant. M. Girard mentionne que la surface du prototype n<sup>o</sup> 31 est rayée en de nombreux endroits; toutefois, ce prototype est toujours utilisé. Le BIPM a ajouté récemment un quatrième prototype d'usage, l'étalon n<sup>o</sup> 67, usiné à l'aide d'un outil à pointe de diamant.

Lors de la première étape de la troisième vérification portant sur l'étude des effets du nettoyage, les prototypes n<sup>os</sup> 9 et 31 n'ont pas été nettoyés et ont servi d'étalons de référence. M. Girard présente un graphique montrant les effets de deux nettoyages et lavages successifs sur la masse du prototype international et de ses six témoins (comparés aux prototypes n<sup>os</sup> 9 et 31). Ce graphique montre qu'environ 80 % de la contamination de surface disparaît avec un seul nettoyage-lavage. Il en conclut que deux nettoyages-lavages suffisent à enlever toute contamination importante.

M. Girard parle ensuite de la perte de masse après nettoyage et lavage subie par des prototypes nationaux étudiés avant le début de la troisième vérification (depuis une quinzaine d'années) ainsi que par le prototype international et ses témoins. Un graphique illustre cette perte de masse en fonction du temps depuis le précédent nettoyage-lavage. À quelques exceptions près, les valeurs se situent assez bien autour d'une droite ayant une pente de  $-1 \mu\text{g}$  par an. M. Girard souligne que même le prototype n<sup>o</sup> 13, qui n'avait pas été nettoyé pendant environ cent ans, se trouve sur cette droite. On peut remarquer que, par extrapolation au temps zéro, la droite indique une perte de masse non nulle. Cela implique que l'augmentation de la masse due à la pollution de la surface s'effectue à un rythme bien supérieur à  $1 \mu\text{g}$  par an au cours des premiers mois qui suivent le nettoyage-lavage.

### *Évolution de la masse de prototypes après nettoyage-lavage*

M. Girard présente ensuite l'évolution de la masse, juste après un nettoyage-lavage, des quatre prototypes suivants : le prototype international et les prototypes n<sup>os</sup> 7, 67, et 73. Les prototypes n<sup>os</sup> 67 et 73 ont été usinés assez récemment à l'aide d'un outil à pointe de diamant. L'étude a été limitée à quatre étalons parce que le transporteur de la balance NBS-2 ne permet de recevoir que six étalons (les quatre en étude et deux étalons de référence). Le graphique qui rassemble les résultats montre une augmentation relativement rapide de la masse de chaque étalon au cours des premières semaines qui suivent le nettoyage-lavage.

### *Évolution de la masse des témoins du prototype international et du prototype n° 25 depuis 1889*

M. Girard termine sa présentation des résultats de la première étape de la troisième vérification par un graphique représentant l'évolution, en fonction du temps, de la masse des six témoins et du prototype d'usage exceptionnel n° 25 par rapport à celle du prototype international ; la date d'origine est 1889. Il souligne que l'on ne peut tirer aucune conclusion des résultats de la première vérification (1910), car il n'a pas été fait usage du prototype international. En 1946, au moment de la deuxième vérification, on avait déjà remarqué que la masse des témoins n<sup>os</sup> 8(41), 32 et 7 avait augmenté (par rapport à celle du prototype international) et que celle du témoin K1, issu de la même coulée que le prototype international, avait diminué. M. Girard indique aussi que les témoins n<sup>os</sup> 43 et 47 ont été fabriqués peu de temps avant la deuxième vérification et avaient alors été vérifiés pour la première fois. Les mesures effectuées durant la première étape de la troisième vérification montrent bien que la tendance à l'augmentation de masse des témoins par rapport au prototype international se confirme. La masse du témoin K1 a, elle aussi, augmenté par rapport à celle du prototype international, et retrouve la valeur qui lui avait été assignée en 1889.

### *Mise en pratique de la définition du kilogramme*

M. Girard rappelle que, sur la base des résultats de la première étape, le CIPM, à sa session de 1989, a décidé que la masse de référence du prototype international, pour les besoins de la troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme, serait celle de ce prototype juste après son nettoyage-lavage. Cette masse est obtenue par extrapolation. Le CIPM a aussi clairement fait savoir qu'il ne s'agissait nullement d'une nouvelle définition du kilogramme. Le CIPM a ensuite demandé au président du CCM de réunir le Groupe de travail sur les étalons de masse afin que celui-ci dise au BIPM s'il convenait d'appliquer

aussi aux prototypes nationaux, au cours de la deuxième étape de la vérification, la procédure traditionnelle de nettoyage et lavage. Le groupe de travail s'est réuni en novembre 1989 pour discuter de cette question. Il a conseillé au BIPM d'appliquer cette même procédure de nettoyage-lavage aux prototypes nationaux.

### *Vérification des prototypes nationaux*

Compte tenu de cette information, M. Girard poursuit par un rapport préliminaire sur la seconde étape de la vérification, celle des prototypes nationaux proprement dite. Il a reçu trente-cinq prototypes et, en plus, il se propose de faire participer à la vérification les nouveaux prototypes commandés au BIPM et les prototypes en réserve, ce qui représente un peu plus de quarante prototypes au total.

Les prototypes nationaux ont été répartis en groupes de dix, pris dans l'ordre chronologique de leur arrivée au BIPM. On procède d'abord à la détermination de la masse de chaque prototype national, dans l'état où il arrive au BIPM. Le prototype est ensuite soumis deux fois au processus de nettoyage et lavage. Sa masse est alors déterminée par comparaison à celle des deux témoins n° 8(41) et n° 32. Ces témoins sont eux aussi nettoyés et lavés, en même temps que l'on procède au second nettoyage-lavage des prototypes nationaux. Deux groupes de dix prototypes nationaux ont été étudiés de cette façon.

M. Girard montre, à l'aide du graphique déjà présenté dans l'introduction (figure 1 du document CCM/91-20) les effets du nettoyage-lavage sur les vingt premiers prototypes nationaux par comparaison aux résultats obtenus précédemment pour le prototype international et ses six témoins. Dans l'ensemble les valeurs obtenues pour les prototypes nationaux se situent sur la même droite de pente  $-1 \mu\text{g}$  par an. On note toutefois quelques exceptions, mais les effets du nettoyage-lavage dépendent non seulement du nombre d'années qui se sont écoulées depuis le précédent nettoyage-lavage mais aussi de l'état de surface et des conditions de conservation du prototype (pureté de l'atmosphère).

M. Girard présente ensuite un graphique (figure 2 du document CCM/91-20) qui montre l'évolution dans le temps des vingt premiers prototypes nationaux par rapport au prototype international. Il n'a pas identifié les prototypes car les résultats sont encore provisoires. Il pense toutefois que les éventuels changements ultérieurs seront très minimes et n'auront pas d'incidence sur les conclusions générales. Il signale que la masse d'un des anciens prototypes a augmenté de façon considérable, d'environ  $100 \mu\text{g}$  depuis 1948. Il souligne que, dans l'ensemble, la masse des prototypes fabriqués depuis 1946 a augmenté davantage que celle des plus anciens.

Deux autres commentaires sont faits pour mieux expliquer les résultats montrés sur ce graphique : (1) les prototypes les plus récents n'ont été comparés qu'aux prototypes d'usage du BIPM et en conséquence



leur masse initiale n'est pas connue de façon aussi exacte que celle des autres prototypes ; (2) parmi les nouveaux prototypes usinés à l'outil à pointe de diamant, certains font preuve d'une stabilité plus grande que d'autres. Ces variations de masse en fonction du temps ne sont pas très bien connues, compte tenu des incertitudes dans la détermination de la masse de ces prototypes et de leur très courte existence.

La vérification des autres prototypes nationaux se poursuit.

#### *Discussion*

Il s'ensuit une discussion animée sur les résultats déjà acquis. M. Bray s'enquiert de la reproductibilité de la masse des prototypes nettoyés et lavés suivant le procédé du BIPM et demande s'il y a un rapport entre les résultats de l'analyse de l'état de surface et le comportement des étalons. M. Girard répond que les études réalisées sur les prototypes soumis au nettoyage-lavage selon le procédé du BIPM ont fait ressortir une reproductibilité de l'ordre de 1 µg. Pour le moment, il n'existe aucune étude sur les effets de surface qui puisse aider à interpréter les résultats observés, mais les membres du Groupe de travail sur les étalons de masse effectuent un travail considérable sur ce sujet (*voir* page G 7).

Faisant référence au dernier graphique présenté,

— Mme Plassa demande si les variations de masse ne seraient pas dues à l'hydrogène piégé qui s'échappe différemment en fonction du temps. Si cela était le cas, les variations de masse en fonction du temps ne devraient-elles pas être corrélées à celles de la masse volumique du prototype ?

— M. Chapman ajoute que le prototype n° 50 est un des prototypes nationaux dont la masse volumique est la plus faible et que son comportement après nettoyage n'est pas reproductible. Les variations observées semblent toutefois aléatoires et non systématiques.

— M. Quinn suggère que l'échauffement des prototypes durant le lavage peut accélérer la diffusion du gaz.

— M. Davis signale qu'à une époque assez ancienne dans l'histoire du BIPM, un prototype avait été exposé dans de l'air sec à 100 °C pendant un an sans que cela ait entraîné une perte de masse significative \*. Toutefois, cette expérience n'a pas été réalisée avec une précision suffisante pour nos besoins actuels.

\* L'invariabilité de l'unité de masse assurée par le kilogramme prototype, In *La création du Bureau international des Poids et Mesures et son œuvre*, Guillaume Ch.-Ed. ed., 1927, 293-304.

Sur la question de la masse volumique des prototypes, M. Girard répond qu'il lui a été possible, en 1965, d'étudier des prototypes de masses volumiques très différentes. On n'avait alors observé aucune différence de comportement inhabituelle. M. Girard se hâte d'ajouter, cependant, que les mesures étaient effectuées à l'aide de la balance Rueprecht, qui avait à l'époque un écart-type d'un ordre de grandeur supérieur à celui de la balance NBS-2. Depuis 1965, la variation de masse de ces prototypes n'a rien montré d'anormal.

En conclusion, M. Girard rappelle que la procédure de nettoyage-lavage du BIPM a fait l'objet d'un rapport dans lequel les différentes étapes du nettoyage-lavage sont décrites en détail (en français et en anglais) ; chaque étape est illustrée par des photographies.

### **3. Rapports des groupes de travail**

Le président du CCM invite les présidents des groupes de travail à présenter leur rapport, en commençant par le Groupe de travail sur les étalons de masse.

#### **3.1 Étalons de masse**

Mme Plassa demande aux délégués de se référer à ses rapports sur les activités du groupe de travail (documents CCM/91-3 et CCM/91-21). Ce dernier document contient neuf annexes décrivant les activités de recherche dans les laboratoires membres. Neuf autres rapports concernant les centres d'intérêt du groupe de travail ont été soumis au CCM comme documents de travail. Le groupe de travail s'est réuni les 28 et 29 mai 1991 pour discuter de ces documents et de questions diverses. Pour organiser de manière cohérente la présentation des différents sujets, Mme Plassa a réparti les différentes activités de recherche du groupe de travail en cinq catégories : effets du nettoyage, effets de l'humidité, corrosion et autres effets de surface, études diverses et comparaisons internationales d'étalons secondaires.

#### *Effets du nettoyage*

Le NRLM a étudié l'augmentation de masse de deux prototypes après nettoyage et lavage (Annexe 7 du document CCM/91-21). Mme Plassa résume les résultats, notant qu'ils sont en accord du point de vue qualitatif avec ceux du BIPM. Du point de vue quantitatif, les résultats du NRLM font apparaître une augmentation de masse initiale plus rapide. Le NRLM a effectué une seconde étude faisant appel aux techniques de spectroscopie par transformation de Fourier infrarouge (technique FT-IR) et de spectroscopie des électrons éjectés par des

photons X (technique XPS) pour détecter la présence de carbone organique sur une surface de platine iridié. Cette étude a permis de constater que le nettoyage par solvant enlève environ la moitié du carbone présent à l'origine mais que celui-ci revient à son niveau initial en quelques heures.

À l'IMGC, (document CCM/91-12), des rubans d'un alliage de platine ont d'abord été nettoyés avec un solvant puis lavés sous un jet de vapeur d'eau pendant des périodes assez longues dans un appareil spécial semblable à celui utilisé pour le nettoyage des éléments des thermomètres à résistance de platine. À la fin du traitement, on ne pouvait plus percevoir de gouttes d'eau individuelles sur la surface du platine, ce qui laisse supposer que la surface était propre. La variation de masse de l'échantillon d'essai était aussi contrôlée et Mme Plassa note que la masse cessait de diminuer bien avant que la surface ne soit mouillée.

À la PTB, (Annexe 8 du document CCM/91-21), on a comparé l'efficacité respective de deux techniques de nettoyage pour des étalons en acier inoxydable. La première technique est celle du nettoyage-lavage utilisée au BIPM pour les prototypes en platine iridié ; la seconde utilise un appareil Soxhlet dans lequel l'échantillon est exposé à la vapeur d'éthanol. Les deux techniques se sont avérées également efficaces pour éliminer la contamination de surface qui avait été volontairement provoquée par les chercheurs.

Le NPL utilise les techniques de spectroscopie des électrons éjectés par des photons X (technique XPS) (Annexe 6 du document CCM/91-21) pour des études de surface dans l'espoir de trouver des corrélations avec les résultats par pesées de la PTB.

#### *Effets de l'humidité*

Mme Plassa remarque que deux documents traitant des effets des variations de l'humidité sur la masse des étalons ont été soumis au CCM. Une étude effectuée au BIPM (document CCM/91-5) a montré que les variations de masse dues aux changements d'humidité étaient étonnamment faibles. Les étalons étudiés avaient été usinés à l'aide d'un outil à pointe de diamant.

Le document CCM/91-1 prend en compte les résultats obtenus par trois laboratoires (PTB, VNIIM, NRLM) pour établir une formule qui décrit les effets de l'humidité lorsque l'on compare des prototypes en platine iridié à des étalons secondaires en acier inoxydable.

#### *Corrosion et autres effets de surface*

Mme Plassa, faisant référence au document CCM/91-11, décrit les études effectuées à l'IMGC sur les aciers inoxydables et les super-

alliages. Les effets de la corrosion électrochimique et de la corrosion occasionnée par un flux d'air ont été comparés. Les deux méthodes donnent des résultats similaires. L'IMGC a été surpris de constater que la résistance à la corrosion de l'acier inoxydable AISI 310 est inférieure à celle de l'acier inoxydable AISI 304, bien que ce dernier contienne relativement moins de chrome et de nickel. On ne peut pas encore tirer de conclusion définitive sur ces alliages, poursuit Mme Plassa, parce qu'il est possible que les échantillons étudiés ne soient pas représentatifs.

D'autres études de surface sont mentionnées dans les Annexes 2 et 6 du document CCM/91-21.

Mme Plassa fait aussi référence au document CCM/91-22 qui décrit les études faites au NIM sur deux alliages, le premier à base de cuivre et l'autre constitué principalement de nickel et de chrome. Les deux alliages ont une masse volumique très proche de  $8\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

#### *Questions diverses*

Mme Plassa signale que deux laboratoires ont conçu des équipements qui permettent de mesurer la susceptibilité magnétique des étalons de masse. Un appareil conçu au BIPM est décrit dans le document CCM/91-7. Un appareil similaire en cours de réalisation à la PTB est décrit dans l'Annexe 8 du document CCM/91-21.

Enfin, Mme Plassa mentionne que deux laboratoires ont fait des expériences sur la détermination directe de la masse volumique de l'air. À la PTB, un appareillage, décrit brièvement dans le document CCM/91-3 et plus en détail dans un récent article de *Metrologia*\*, a été utilisé pour mesurer la masse volumique de l'air avec une incertitude relative d'environ  $5 \times 10^{-5}$ . Le VNIIM (Annexe 3 du document CCM/91-21) travaille dans la même direction.

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

Des comparaisons bilatérales d'étalons de un kilogramme ont donné de bons résultats en Europe de l'Est (Annexe 3 du document CCM/91-21). L'Annexe 9 du même document décrit le travail effectué en Europe de l'Ouest pour comparer les sous-multiples du kilogramme. Dans cette étude, les participants sont parvenus à un accord à  $2 \times 10^{-7}$  pour des étalons de masse nominale aussi petite que 10 g.

Mme Plassa donne ensuite les caractéristiques principales, exposées au cours de la réunion récente du groupe de travail, d'une comparaison internationale d'étalons secondaires de 1 kg. Un questionnaire préliminaire (document CCM/91-13) a révélé un très large intérêt pour ce projet.

La comparaison internationale d'étalons secondaires de 1 kg devrait commencer à la fin de 1993. Cela donne le temps de terminer la

\* GLÄSER M., SCHWARTZ R., MECKE M., Experimental Determination of Air Density Using a 1 kg Mass Comparator in Vacuum, *Metrologia*, 1991, 28, 45-50.



troisième vérification périodique et permet aux laboratoires nationaux de réétalonner leurs étalons secondaires. Le BIPM a accepté d'être le laboratoire pilote. Deux étalons de transfert en Nicral D seront fournis par le VSL et deux autres d'un acier inoxydable spécial seront fournis par le CSMU. Le BIPM utilisera ses deux étalons en Nicral D comme étalons de référence. Le groupe de travail a décidé d'effectuer cette comparaison internationale suivant un schéma en « marguerite » de façon à ce que chaque paire d'étalons de transfert soit envoyée à trois ou quatre laboratoires nationaux seulement avant de revenir au BIPM pour un nouvel étalonnage.

Le groupe de travail a examiné certains détails préliminaires concernant ce projet et a défini ce qui doit être fait avant le début de la comparaison internationale, en 1993.

Ainsi se termine le rapport de Mme Plassa.

Se référant au document CCM/91-1, M. Bray demande à M. Gläser de clarifier deux points : pourquoi a-t-il choisi une humidité relative de 45 % comme valeur de référence ? le document doit-il être considéré comme une recommandation pour la correction des effets de l'humidité relative sur les étalons en acier inoxydable et en platine iridié ? À la première question, M. Gläser répond que 45 % est une valeur acceptable, si on la considère comme une moyenne des valeurs données par les trois laboratoires. Quant au second point, la formule établie ne doit être considérée qu'à titre indicatif. Il précise qu'il ne dispose pas d'assez de données actuellement pour présenter une recommandation définitive.

Le président demande maintenant à M. Davis de présenter le rapport de son groupe de travail.

### 3.2 Masse volumique

M. Davis se réfère à son rapport (document CCM/91-10) qui résume les activités du groupe de travail et des laboratoires membres. Le groupe de travail s'est réuni le 28 mai 1991.

Les résultats d'une comparaison internationale de masse volumique de corps solides, organisée par le groupe de travail, et pratiquement terminée à l'époque de la précédente session du CCM en 1988, ont été publiés dans *Metrologia* \*.

#### *Établissement d'une table de la masse volumique de l'eau*

Le groupe de travail a toujours comme objectif principal de compiler une table de valeurs recommandées pour la masse volumique de l'eau

\* DAVIS R. S., Report of Density Intercomparisons Undertaken by the Working Group on Density of the CCM, *Metrologia*, 1990, 27, 139-144.

fondée sur des résultats de mesures récentes. Lors de la précédente session du CCM, un groupe restreint constitué de représentants du BIPM, du CSIRO et du NRLM avait été chargé de ce travail. M. Masui, qui avait rédigé un rapport préliminaire au nom de ce groupe restreint (document CCM/91-16), en a remis une version détaillée, comportant de nombreuses annexes, à M. Davis et aux autres membres de ce groupe.

La description mathématique de la masse volumique de l'eau comporte deux parties. La première partie est la formule donnant la dilatation thermique de l'eau dans un domaine de température (par exemple 0 °C à 40 °C). La seconde partie porte sur l'attribution à la masse volumique d'une valeur à une température de référence, qui peut être la température de la masse volumique maximale. L'analyse par M. Masui des résultats des mesures de dilatation thermique faites au CSIRO et au NRLM montre un accord à  $1 \times 10^{-6}$  près dans un domaine de température compris entre 0 °C et 40 °C. En ce qui concerne la masse volumique de l'eau à la température de référence, la différence entre les résultats des mesures dans les deux laboratoires est d'environ  $3 \times 10^{-6}$ . Le travail se poursuit pour tenter de supprimer ce désaccord. De toute façon, M. Masui et les autres membres du groupe restreint pensent que le projet de la table de la masse volumique de l'eau pourrait être mis dans sa forme définitive en 1992.

M. Davis mentionne que, lors de la réunion du groupe de travail, M. Bettin (PTB) a indiqué que son laboratoire se préparait actuellement à faire des mesures de la masse volumique de l'eau et qu'il pensait que les résultats définitifs pourraient être obtenus d'ici deux à trois ans.

#### *Masse volumique de l'air*

M. Davis aborde ensuite la question de la masse volumique de l'air. Une exactitude de  $5 \times 10^{-5}$  a été obtenue à la PTB dans la détermination directe de la masse volumique de l'air (déjà mentionnée au chapitre 3.1, page G 9). Cette mesure est bien en accord avec la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981). M. Gläser a résumé brièvement ces expériences pour le groupe de travail. Un travail préliminaire sur ce sujet a aussi été décrit par le CSMU et le NPL.

Le document CCM/91-15 rend compte également d'autres études sur la masse volumique de l'air. Il décrit le travail expérimental effectué au Statens Provningsanstalt (SP), où les variations de la masse volumique de l'air à l'intérieur d'une balance ont été étudiées de trois façons : calcul selon la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981) ; mesure directe de la poussée de l'air sur les étalons ; mesure de l'indice de réfraction de l'air. Cette dernière méthode, adaptée aux mesures de masse, a été mise au point ces dernières années au SP.

*Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981/1991)*

Enfin, M. Davis attire l'attention des délégués sur le document CCM/91-9, qui met à jour, dix ans après, la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981). M. Davis remercie tout particulièrement M. Carré, maintenant à la retraite, qui a été l'un des principaux rédacteurs de ce document en 1981, pour l'aide précieuse qu'il lui a apportée. Il rappelle la publication initiale dans les *Procès-verbaux du CIPM*\* et dans *Metrologia*\*\* de la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981). M. Davis remarque que la formule publiée dans ces documents est toujours valable, mais que CODATA a recommandé depuis lors une meilleure estimation de la constante molaire des gaz  $R$ . De plus, une nouvelle analyse des données secondaires a entraîné de légers changements dans les calculs de la pression de vapeur saturante  $p_{sv}$  et du facteur de compressibilité  $Z$ . M. Davis ajoute que, depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1990, la température est mesurée conformément à l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90). Ce changement n'a pas d'incidence sur la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981), mais il permet d'améliorer la mesure de la température thermodynamique  $T$  qui est prise en compte en dénominateur.

Les valeurs de la masse volumique de l'air, calculées à l'aide de la formule de 1981 modifiée pour tenir compte des changements ci-dessus, se situent dans les limites des incertitudes données pour la formule de 1981. De plus, l'incertitude globale de la formule modifiée n'est pas réduite de manière significative. M. Davis remarque que le groupe de travail recommande, néanmoins, d'effectuer ces changements pour suivre les progrès actuels de la science, en particulier en ce qui concerne la constante molaire des gaz.

Les délégués approuvent ce point de vue, mais une vive discussion s'ensuit sur la meilleure manière de mettre cette formule en pratique. Finalement, le groupe de travail demande à M. Davis de rédiger un document faisant le point sur les changements à apporter à la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981). Les délégués souhaitent que M. Davis fasse bien ressortir que la formule de base de 1981 reste identique mais que l'on dispose maintenant de meilleures estimations de certains paramètres entrant dans la formule. Les délégués sont d'accord pour recommander au CIPM de modifier la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide de 1981 afin de tenir compte des changements mentionnés ci-dessus (voir Recommandation G 1 (1991), page G 26). Il est suggéré, si le

\* *BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1981, 49, C1-C15.

\*\* Equation for the Determination of the Density of Moist Air (1981), *Metrologia*, 1982, 18, 33-40.

CIPM approuve la Recommandation G 1 (1991), que la formule modifiée soit dénommée « Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981/1991) ».

Ainsi se termine le rapport de M. Davis. Le président demande ensuite à M. Peters de présenter le rapport de son groupe de travail.

### 3.3 Force

M. Peters indique tout d'abord que son groupe de travail s'est réuni les 16 et 17 octobre 1990 à Braunschweig et que le document CCM/91-6 est le rapport de cette réunion. Il rappelle que l'activité de ce groupe de travail portait précédemment sur les mesures de force jusqu'à 1 MN et que les travaux entrepris dans ce domaine ont été menés à bien.

#### *Mesures de force au-dessus de 1 MN*

Depuis 1988, le groupe de travail s'est intéressé aux mesures de force au-dessus de 1 MN. La réunion d'octobre 1990 portait principalement sur « Les différents principes des machines de mesure de force et leur stabilité à long terme ».

M. Peters dit qu'il n'existe dans le monde que quelques machines de mesure de force à masse suspendue d'une capacité supérieure à 1 MN et remarque que cela est dû, entre autres, à des problèmes de stabilisation et de reproductibilité au chargement. C'est ainsi que d'autres techniques sont souvent utilisées : machines à levier ou à amplification hydraulique par exemple. Les machines à levier ont une capacité allant jusqu'à 3 MN. M. Peters mentionne alors les machines à amplification hydraulique fabriquées en Allemagne, en République populaire de Chine et au Japon, qui amplifient la force au moyen de deux cylindres à piston. De telles machines permettent de mesurer une force allant jusqu'à 20 MN avec une incertitude d'environ  $1 \times 10^{-4}$ . M. Peters fait remarquer que les résultats d'une comparaison récente entre la PTB et le NIST se situent bien dans ces limites. Toutefois, ces machines posent de sérieux problèmes techniques, tels que les vibrations et une sensibilité à la surcharge.

Les systèmes à pyramide de capteurs permettent aussi de mesurer des forces élevées. M. Peters rapporte que le NPL utilise cette technique, de 1 kN à 30 MN, avec une incertitude d'environ 1/2000. Il dit qu'il est difficile de diminuer l'incertitude du fait des problèmes techniques rencontrés pour chaque capteur, tels que la stabilité à long-terme. Pour diminuer l'incertitude au maximum, le capteur doit être étalonné tous les trois ou quatre mois et doit être chargé tous les quelques jours.

M. Peters ajoute que les besoins de l'industrie en machines de mesure de force d'une exactitude élevée augmentent dans de nombreux pays.

Le groupe de travail a donc l'intention de publier un rapport faisant le point sur les expériences effectuées dans les laboratoires membres. M. Peters dit qu'en Allemagne, par exemple, il devient nécessaire d'étalonner des forces supérieures à 20 MN avec une incertitude de  $10^{-3}$  à  $10^{-4}$ .

#### *Stabilité à long terme*

La prochaine réunion du groupe de travail, qui se tiendra au NPL, traitera principalement de la stabilité à long terme des capteurs utilisés pour mesurer des forces élevées. Alors que le groupe de travail vient de finir de mettre au point une méthode commune pour calculer l'incertitude des machines de mesure de force d'une capacité allant jusqu'à 1 MN, M. Peters signale qu'il est maintenant nécessaire de mettre au point une méthode uniforme pour calculer l'incertitude des systèmes à pyramide de capteurs.

Pour éviter toute confusion, le groupe de travail a suggéré d'utiliser une nomenclature commune pour les machines de mesure de force.

M. Peters termine son rapport en disant que, comme par le passé \*, les comptes rendus de la réunion de son groupe de travail seront publiés par la PTB.

#### *Discussion*

Le président remercie M. Peters pour son rapport. Avant de poursuivre la discussion, M. Bray fait toutefois remarquer que la nomenclature proposée pour les machines de mesure de force lui semble poser quelques problèmes. M. Peters répond qu'il est peut-être souhaitable, en effet, de modifier la nomenclature proposée. Toutefois, le plus important à ses yeux, c'est qu'une nomenclature uniforme existe et que les premiers pas aient été faits en ce sens. À une seconde question de M. Bray concernant l'exactitude globale des capteurs de force, M. Peters répond qu'il est très important de savoir comment a été effectué l'étalonnage et de connaître l'historique du capteur. Par exemple, le fait d'enlever et de replacer un capteur dans une machine de mesure de force peut entraîner des variations importantes.

Pour information, M. Wilson présente aux délégués les plans du NPL pour l'étalonnage des masses étalons destinées à la nouvelle machine de 1,2 MN. Un schéma a été conçu pour étalonner les éléments de 2,5 t avec une exactitude de quelques  $10^{-6}$ . De plus, le NPL a organisé une comparaison internationale de mesures de masse avec trois autres laboratoires nationaux.

\* Le rapport complet de la réunion du Groupe de travail « Force » (mai 1988), ainsi que le texte des documents présentés, ont été publiés dans *PTB-Bericht MA-17*, janvier 1990, 104 pages.

M. Bray dit que l'expérience faite à l'IMGC avec la machine de mesure de force de 30 kN a montré que l'exactitude n'est pas seulement limitée par les masses internes mais aussi par la géométrie de la machine. Par exemple, des variations en hauteur de l'ordre de 0,1 mm sur 5 m ont une influence importante.

M. Peters pense que les comparaisons de masse organisées par le NPL risquent de révéler des désaccords importants entre les participants.

La discussion étant terminée, le président demande à M. Molinar de présenter le rapport de son groupe de travail.

### **3.4 Hautes pressions**

M. Molinar présente le rapport de son groupe de travail (document CCM/91-4). Il cite tout d'abord les trois principales activités que celui-ci a mené à bien : publication (*BIPM Monographie 89/1*) des vingt-trois contributions présentées à un séminaire sur la « Métrologie des hautes pressions » qui s'est tenu en mai 1988 ; préparation d'un répertoire des laboratoires de métrologie des hautes pressions (une deuxième édition de ce répertoire est prévue pour 1992) ; achèvement de la quatrième et dernière phase des comparaisons internationales de pression en milieu liquide de 20 MPa à 100 MPa (document CCM/91-2).

#### *Comparaisons dans le domaine de 20 MPa à 100 MPa*

M. Molinar résume les résultats définitifs de ces comparaisons qui ont représenté un travail majeur pour le groupe de travail. Les résultats feront l'objet d'une publication dans *Metrologia*. Les comparaisons internationales ont duré dix ans, dix-sept laboratoires nationaux y ont participé, le LNE agissant comme laboratoire pilote. Les participants ont eu à mesurer la surface effective, dans tout le domaine de pression, d'un piston et d'un cylindre utilisés comme étalon de transfert. Les résultats ont été ramenés à deux paramètres : surface effective à basse pression et coefficient de déformation en fonction de la pression. M. Molinar présente les résultats obtenus pour ces deux paramètres. Il conclut que, pour améliorer les possibilités actuelles, il conviendrait de porter ses efforts sur une meilleure interprétation du coefficient de déformation en fonction de la pression.

#### *Comparaisons jusqu'à 1 GPa*

M. Molinar présente ensuite un rapport sur l'avancement des comparaisons internationales en milieu liquide jusqu'à environ 1 GPa. Les laboratoires participants ont été répartis en trois groupes. Le premier groupe, avec le LNE comme laboratoire pilote, a commencé ses comparaisons. Les mesures couvriront le domaine de 100 MPa à 700 MPa et s'étendront peut-être jusqu'à 1 GPa. Le deuxième groupe, avec le

VNIIFTRI comme laboratoire pilote, a terminé ses comparaisons. Les résultats ont été publiés dans la *Monographie* 89/1 du BIPM, déjà citée. Le troisième groupe doit encore organiser des comparaisons multilatérales ; une comparaison bilatérale a déjà été effectuée.

La coopération multilatérale entre les laboratoires européens s'est aussi exprimée à travers des programmes organisés sous les auspices d'EUROMET et du Bureau communautaire de référence de la Commission des communautés européennes.

Ensuite, M. Molinar rappelle brièvement le travail effectué pour mesurer ou calculer le coefficient de déformation en fonction de la pression d'un ensemble piston-cylindre.

Des progrès ont aussi été réalisés dans l'étude des capteurs utilisés comme étalons de transfert dans le domaine du gigapascal. La répétabilité et l'hystérésis ont été mesurées par le NIST et l'IMGC et ont fait l'objet d'un rapport.

M. Molinar souligne l'importance de certains paramètres pour obtenir une bonne reproductibilité dans les mesures faites avec les jauges de pression à gaz. Il illustre ce point en montrant des études sur les variations de la surface effective en fonction de la hauteur du piston, de la vitesse de rotation du piston, du type de gaz utilisé et du mode de fonctionnement (absolu ou relatif). Les effets observés suggèrent que des modèles plus élaborés sont nécessaires pour calculer la surface effective de l'ensemble piston-cylindre. Tant que ces problèmes ne seront pas résolus, des incertitudes inférieures à  $10^{-5}$  seront difficiles à obtenir.

Le groupe de travail s'est réuni au BIPM le 29 mai 1991 et a discuté du rôle qui pourrait être — ou non — le sien dans l'accréditation des laboratoires de métrologie des pressions. M. Molinar se fait le porte-parole de ses collègues pour indiquer l'accord général pour que ce travail n'entre pas dans les attributions d'un groupe de travail du CCM. (De nombreux délégués du CCM ont spontanément approuvé cette conclusion).

Pour faire le point sur la situation actuelle en métrologie des hautes pressions, M. Molinar présente un graphique (figure 5 du document CCM/91-4) montrant la diminution de l'exactitude des étalonnages avec l'augmentation de la pression entre environ 1 MPa et 10 GPa. Il mentionne aussi la technologie appropriée à la mesure des plus hautes pressions. Ces dernières présentent un intérêt scientifique, par exemple en géologie, et M. Molinar pense que le groupe de travail pourrait envisager dans le futur une activité dans ce domaine de pressions.

#### *Décisions pour les travaux futurs*

M. Molinar conclut son rapport en citant les décisions prises par le groupe de travail lors de sa récente réunion :

— publier une deuxième édition du répertoire des laboratoires de métrologie des hautes pressions ;

- poursuivre les comparaisons internationales à 700 MPa ;
- échanger des informations sur la mesure des surfaces effectives et des coefficients de déformation en fonction de la pression ;
- coopérer pour développer de meilleures méthodes de calcul des coefficients de déformation des ensembles piston-cylindre en fonction de la pression ;
- organiser un séminaire, en 1993 ou en 1994, sur des questions intéressant le groupe de travail.

M. Peters fait remarquer que les mesures dimensionnelles nécessaires au calcul de la surface effective du piston posent des problèmes qui touchent aux limites de nos possibilités actuelles. M. Molinar répond que le LNE et la PTB étudient ensemble cette question.

Le président félicite M. Molinar pour son exposé et demande à M. Stuart de présenter le rapport de son groupe de travail.

### 3.5 Moyennes pressions

#### *Comparaisons internationales dans le domaine de 10 kPa à 140 kPa*

M. Stuart présente le rapport de son groupe de travail (document CCM/91-18). La principale activité reste l'organisation des comparaisons internationales dans le domaine de 10 kPa à 140 kPa. M. Stuart rappelle que l'étalon de transfert est une balance de pression spéciale (aussi appelée jauge de pression à piston) capable de fonctionner en mode absolu ou relatif, c'est-à-dire capable de générer des pressions absolues ou des pressions relatives par rapport à l'atmosphère ambiante. Les comparaisons s'effectuent selon un schéma en « marguerite ». Sur une période de douze mois, trois laboratoires différents ont effectué des mesures avec l'étalon de transfert, qui est ensuite revenu au laboratoire pilote (NPL). Ce mode de fonctionnement est dicté principalement par la limite de validité (un an) du carnet ATA, document utilisé pour faciliter les formalités douanières. Les participants à la comparaison utilisent tous l'étalon de transfert pour générer une pression qui est ensuite mesurée à l'aide de leur instrument d'étalonnage primaire. Dans la plupart des cas, mais pas tous, cet instrument est un manomètre à mercure. Tous les participants doivent corriger leurs résultats pour tenir compte de l'accélération due à la pesanteur et de la température de référence (20 °C).

M. Stuart présente ensuite des graphiques extraits de son rapport montrant des résultats de mesure de la surface effective normalisée en fonction de la pression obtenus en mode absolu et en mode relatif. M. Stuart indique que la surface effective absolue n'est pas donnée afin que les futurs participants à la comparaison ne soient pas influencés par la connaissance des résultats des autres laboratoires. Les barres



d'erreur pour chaque point ne tiennent compte que des incertitudes de type A fournies par chaque laboratoire. Les mesures effectuées à ce jour permettent de tirer plusieurs conclusions : (1) il est clair que les différences observées entre les laboratoires dépassent généralement les incertitudes de type A qui ont été communiquées, et souvent de beaucoup ; (2) comme on s'y attendait, il n'est pas évident que la surface effective du piston soit une fonction de la pression ; (3) la surface effective du piston ne varie pas en fonction du temps, ce qui est plus surprenant.

Deux nombres, selon M. Stuart, soulignent l'utilité de ces comparaisons : cinq nouveaux laboratoires ont demandé à participer à cette comparaison et la moitié des laboratoires participants ont décidé de reconstruire leur manomètre.

#### *Intérêt pour une comparaison dans le domaine de 0,1 MPa à 1 MPa*

Lors de la réunion qui a précédé le CCM, le 29 mai, les membres du groupe de travail ont exprimé leur intérêt pour l'organisation de comparaisons dans le domaine de 0,1 MPa à 1 MPa. Il est nécessaire de trouver un laboratoire pilote.

M. Quinn demande à M. Stuart si les résultats des comparaisons internationales ont correspondu ou non à l'attente des participants, compte tenu que les résultats sont en accord à  $10^{-5}$  près (en excluant les plus mauvais résultats), M. Stuart répond que le fait que l'incertitude de type A ne suffise pas à rendre compte de la dispersion des résultats entre les laboratoires rend nécessaire de procéder à des études plus poussées.

Le président demande ensuite à M. Tilford de présenter le rapport de son groupe de travail.

### **3.6 Basses pressions**

Avant de commencer son rapport, M. Tilford explique pourquoi il y a eu dans le passé deux groupes de travail séparés sur les basses et les très basses pressions. Il souligne que les deux groupes de travail se partagent six décades de pressions et font appel à des techniques différentes. Du point de vue de la physique, un gaz peut être considéré comme un fluide au-dessus d'environ 1 kPa mais au-dessous de cette pression de transition il doit être considéré comme un ensemble de particules élémentaires. Ces deux modèles physiques distincts ont conduit à la création de deux groupes de travail différents.

#### *Nouvelles comparaisons entre 1 Pa et 1 kPa*

M. Tilford commence ensuite son rapport (document CCM/91-19). Il rappelle que, lors de la précédente réunion du CCM en 1988, il avait présenté les résultats d'une comparaison internationale entre 1 Pa et

1 kPa. Le désaccord extrêmement important entre les participants, dû en partie aux variations des étalons de transfert, a conduit à analyser de nouveau les résultats originaux et à étudier plus en détail les étalons de transfert.

Les étalons de transfert, des jauges à diaphragme à variation capacitive, sont très largement non-linéaires en raison des effets thermomoléculaires. Pour cette raison, il est difficile de comparer des résultats qui n'ont pas été obtenus à une même pression, bien qu'une tentative ait été faite en ce sens. En qualité de laboratoire pilote, le NIST continue d'étudier les étalons de transfert ; il semble qu'ils soient maintenant plus stables que lors de leur première utilisation. Dans ces conditions, les membres du groupe de travail aimeraient répéter leurs mesures. L'IMGC et le NRLM souhaitent se joindre à la comparaison. Par ailleurs, deux des participants à la première comparaison ont modifié leurs installations depuis qu'ils ont effectué les premières mesures. Les laboratoires participants font appel à des techniques différentes pour leurs étalons, ce qui rend les comparaisons encore plus intéressantes. Le groupe de travail, qui s'est réuni le 28 mai 1991, a décidé d'organiser de nouvelles comparaisons en 1992. De plus, un bref rapport décrivant les comparaisons initiales sera préparé en vue de sa publication.

Ainsi se termine le rapport de M. Tilford. Il ajoute, cependant, que les membres du Groupe de travail sur les très basses pressions ont tenu une réunion officieuse au cours de laquelle ils se sont mis d'accord pour organiser des comparaisons à  $10^{-7}$  Pa quand ils auront trouvé un étalon de transfert convenable.

Faisant référence à la très grande instabilité constatée sur les jauges à diaphragme à variation capacitive, M. Wilson demande s'il ne serait pas possible d'utiliser un autre type d'instrument. M. Tilford répond que ce domaine de pressions est difficile à étudier, pour les raisons invoquées dans son introduction. Il est possible de mesurer les plus hautes pressions de ce domaine à l'aide de jauges à spirale en quartz, alors qu'il est préférable de mesurer les plus basses pressions à l'aide de jauges à rotor tournant.

Mme Plassa demande quels seraient les étalons de transfert à utiliser pour les comparaisons internationales proposées aux très basses pressions. M. Tilford répond que l'étalon de transfert choisi serait probablement une jauge à ionisation, du type Bayard-Alpert ou à extraction d'ions.

#### *Fusion des groupes de travail sur les basses et les très basses pressions*

Le président demande s'il serait possible de fusionner les Groupes de travail sur les basses et les très basses pressions. M. Kaiser, qui a été nommé récemment président du Groupe de travail sur les très basses pressions, est d'accord avec M. Tilford pour fusionner ces deux groupes. Mme Plassa remarque que le fait d'avoir fusionné les Groupes de travail

sur les étalons de masse primaires et secondaires a été un succès et souhaite qu'il en soit de même dans ce cas. Cette proposition est approuvée à l'unanimité.

Après discussion, il est décidé que le nouveau groupe de travail s'appellera Groupe de travail sur les basses pressions. Le président demande à M. Tilford d'en assurer la présidence. Cette proposition étant approuvée à l'unanimité, M. Tilford accepte.

Ainsi se termine la présentation des rapports des groupes de travail.

M. Quinn, s'adressant aux présidents de tous les groupes de travail, leur demande instamment de publier les résultats des comparaisons internationales et de leurs autres activités importantes le plus tôt possible.

#### **4. Masse volumique du mercure**

M. Tilford devant quitter la France le lendemain et ne pouvant assister à la dernière séance du CCM, le président l'autorise à soumettre dès maintenant un projet de recommandation à l'approbation du CCM. M. Tilford souligne que la manométrie de précision repose sur la connaissance d'une valeur exacte de la masse volumique du mercure. Il affirme que les variations naturelles de la masse volumique du mercure et la rareté des laboratoires équipés pour effectuer des mesures relatives ou absolues de cette masse volumique avec une exactitude élevée peuvent poser problème. Pour améliorer cette situation, ou tout au moins pour prévenir sa détérioration, il propose au CCM d'adopter une recommandation pour encourager le développement et le maintien de certaines compétences dans la mesure de la masse volumique du mercure.

Une discussion s'ensuit. Certains délégués font remarquer qu'un changement de température de 5,5 mK seulement entraîne une variation de la masse volumique du mercure de l'ordre de  $1 \times 10^{-6}$ . M. Tilford est aussi d'avis que le contrôle de la température pose de sérieux problèmes techniques en manométrie mais il affirme que des différences relatives de la masse volumique du mercure peuvent entraîner des différences notables entre les manomètres. Après quelques discussions sur la rédaction de la recommandation, les délégués donnent leur approbation (voir Recommandation G 2 (1991), page G 27).

Le président demande ensuite à M. Quinn de présenter son rapport.

#### **5. Études sur les balances prototypes**

M. Quinn rappelle aux délégués qu'un « Club » sur les balances, non officiel, a été créé lors de la précédente session du CCM afin d'échanger des informations sur la conception et la construction de balances de



précision. Le Club s'est réuni pour la première fois le 29 mai 1991 et M. Quinn propose maintenant de faire le tour des exposés présentés à cette réunion.

#### *Balance à suspensions flexibles du BIPM*

Il commence par une description de la balance à suspensions flexibles du BIPM. Les éléments critiques de cet instrument sont exposés. Il s'agit des lames flexibles et de leurs montures cinématiques, des deux ensembles de couteaux croisés à chaque suspension de plateau, des dispositifs d'amortissement des plateaux et d'asservissement strict du fléau en position horizontale (même lors de l'échange d'étalons sur le plateau). M. Quinn dit que le BIPM construit actuellement une nouvelle balance à suspensions flexibles qui, selon toute probabilité, remplacera la balance NBS-2.

#### *Programme d'EUROMET*

M. Quinn mentionne ensuite l'exposé de M. Pendrill, concernant un programme d'EUROMET concernant les pesées automatiques. Les participants de quatre laboratoires nationaux d'Europe occidentale ont mis en commun leurs informations sur des balances de différentes capacités, de 50 kg à 100 g. M. Pendrill indique que les résultats obtenus feront l'objet d'une publication.

#### *Balance hydrostatique de l'IMGC*

M. Mosca (IMGC) a présenté un rapport sur une balance hydrostatique automatisée qui permet de comparer des masses dans l'air ou dans l'eau. M. Quinn fait remarquer que la dynamique de la balance est différente selon qu'elle fonctionne dans l'air ou dans l'eau, ce qui a conduit M. Mosca et ses collègues à mettre au point un système d'asservissement numérique. Ce système est décrit dans un projet d'article distribué lors de la réunion du Club.

#### *Comparateur du CSMU*

Un nouveau comparateur de masses de un kilogramme a été construit par le CSMU. Il est décrit dans un document distribué par M. Spurny. Une figure extraite de ce document illustre la conception de cette nouvelle balance à un seul plateau, qui est similaire à celle de la balance NBS-2.

M. Quinn termine son exposé en remarquant que les participants à la réunion du Club ont trouvé celle-ci intéressante et sont favorables à ce qu'elle soit renouvelée.

*Erreurs causées par des aimants dans une balance*

Le président remercie M. Quinn pour sa présentation et demande à M. Davis de résumer le document CCM/91-8, dont il est l'auteur. M. Davis explique que ce document étudie les erreurs de pesée prévisibles, dues aux petits aimants puissants et non blindés placés sur le fléau d'un comparateur de masses de un kilogramme. L'étude était justifiée par le fait que c'est le cas de la balance à suspensions flexibles du BIPM. M. Davis présente les sources possibles d'erreurs de pesée et conclut qu'elles peuvent être rendues négligeables par une conception appropriée et en choisissant soigneusement les matériaux.

**6. Situation actuelle et travaux futurs  
pour une éventuelle redéfinition du kilogramme**

*Détermination de l'unité de masse atomique*

Le président demande à M. Gläser de présenter sa nouvelle proposition pour la détermination de l'unité de masse atomique et, pour une éventuelle redéfinition du kilogramme (document CCM/91-14). L'idée de base de l'expérience est que des atomes d'un élément choisi ( $^{197}\text{Au}$  semble être le meilleur candidat) soient ionisés et dirigés vers une cible pour y être recueillis et éventuellement pesés. Alors que l'or s'accumule, un courant électrique circule vers la cible pour la conserver à une tension constante. Le courant peut être contrôlé à l'aide d'un circuit composé d'un comparateur de courant, d'un étalon de résistance de Hall quantifiée et d'un étalon de tension de Josephson. M. Gläser fait la démonstration mathématique de la simplicité du résultat obtenu :

$$m = C m_a \int_0^{t_m} f(t) dt$$

où  $m$  est la masse totale de l'or accumulé sur la cible pendant un temps  $t_m$ ,  $m_a$  la masse atomique de l'or et  $f(t)$  la fréquence micro-onde requise pour produire une tension de Josephson. Le facteur  $C$  est simplement le rapport de nombres entiers connus.

La masse  $m$ , pouvant aller en principe jusqu'à 100 g, est déterminée par comparaison à un étalon. La valeur de l'unité de masse atomique  $u$  peut être calculée compte tenu que  $m_a = A_r u$  et que  $A_r$ , la masse atomique de l'or par rapport à celle du  $^{12}\text{C}$ , est bien connue. Si l'expérience fonctionnait bien,  $m$  pourrait devenir l'étalon de masse. Dans ce cas, le kilogramme pourrait être défini comme un nombre spécifié d'atomes de  $^{197}\text{Au}$  et la mole deviendrait alors une unité dérivée.

Cette présentation fait l'objet de nombreuses questions sur des détails techniques tels que l'efficacité de la cible, l'élimination des impuretés et le temps pendant lequel les atomes sont collectés.

M. Gläser reconnaît que l'expérience n'a pas encore été faite mais remarque que, bien qu'il puisse y avoir des inconnues du point de vue technique, il n'existe pas de raison fondamentale pour que l'on n'atteigne pas une exactitude minimale de l'ordre de  $10^{-8}$ . Il suggère des moyens de résoudre les problèmes expérimentaux évoqués par certains délégués.

*Autres expériences visant à mettre au point une nouvelle définition du kilogramme*

Le président demande alors à M. Quinn de résumer les autres expériences visant à mettre au point une nouvelle définition du kilogramme.

M. Quinn commence par s'interroger sur la nécessité d'une nouvelle définition du kilogramme. On peut considérer, d'une manière superficielle, que la définition actuelle est suffisante. Mais ce point de vue, qui implique de se fier à un étalon matériel, s'oppose à la philosophie même de la métrologie. La question primordiale est : À quel niveau une nouvelle définition doit-elle être bonne ?

Il rappelle aux participants qu'à la dernière Conférence on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), à Ottawa (1990), une séance a été consacrée à la question d'une éventuelle redéfinition du kilogramme, au cours de laquelle il a présenté un article\* sur la situation actuelle de nos connaissances sur le kilogramme. Comme il l'a expliqué, il est possible de fixer des limites à la stabilité du prototype international du kilogramme en effectuant des mesures de comparaison avec les témoins et les prototypes nationaux. Sur une courte période, la stabilité relative des prototypes entre eux est de l'ordre de  $10^{-9}$ , mais, sur les cent ans d'histoire des prototypes, on constate que leurs masses divergent.

Bien que cela ne puisse être prouvé, poursuit M. Quinn, il est raisonnable d'espérer que, au fil du temps, les variations absolues de masse des prototypes n'excèdent pas dix fois leurs variations relatives. En suivant cette logique jusqu'au bout, il est possible de conclure que la stabilité du kilogramme se situe à l'intérieur de  $5 \times 10^{-9}$  par an.

M. Quinn ajoute que M. Davis a publié un article dans *Metrologia*\*\* dans lequel il étudie des mesures précises de différentes constantes physiques pour voir si elles mettent en évidence une éventuelle instabilité à long terme du kilogramme. Aucune instabilité significative n'a été relevée, mais il a pu toutefois calculer les limites de la stabilité du kilogramme. Bien que ces limites aient l'intérêt d'être les plus petites que l'on puisse déceler à partir des observations extérieures, elles sont encore beaucoup trop grandes et ne sont d'aucune aide dans la discussion actuelle.

---

\* QUINN T. J., The Kilogram : The Present State of our Knowledge, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1991, **IM-40**, 81-85.

\*\* DAVIS R. S., The Stability of the SI Unit of Mass as Determined from Electrical Measurements, *Metrologia*, 1989, **26**, 75-76.

Les expériences visant à contrôler la stabilité du kilogramme doivent avoir une reproductibilité d'au moins  $10^{-8}$  pour être d'une quelconque utilité dans les prochaines années.

M. Quinn fait ensuite le tour des expériences en cours. Il mentionne tout d'abord le projet de la PTB portant sur le comptage du nombre d'atomes d'un objet en silicium. La détermination des dimensions de cet objet avec une exactitude suffisante pose un important problème expérimental. La solution pourrait consister à fabriquer un objet dont la forme même serait une constante de la nature.

Ensuite, il cite les expériences dans lesquelles le poids d'un étalon de masse est comparé à une force électromagnétique. Dans ce type d'expérience, en cours à la PTB et au NIST, il est nécessaire d'effectuer des mesures de tension et de courant électrique, de vitesse et d'accélération locale due à la pesanteur. Selon M. Quinn, il ne semble pas y avoir d'obstacle fondamental pour effectuer les mesures requises avec une exactitude suffisante, mais de sérieux problèmes pratiques doivent encore être résolus. Un appareil construit au NPL ne permet d'atteindre qu'une incertitude de  $10^{-7}$  seulement. Une version améliorée est actuellement en construction.

M. Quinn conclut en décrivant une autre expérience, étudiée pour la première fois au Japon, qui est fondée sur la lévitation d'une masse supraconductrice. Toutefois la précision obtenue à l'aide de cet appareil est moins bonne qu'avec la balance de force du NPL.

M. Gläser souligne que, pour être exhaustif, il ne faut pas oublier les expériences électrostatiques, qui permettent de comparer l'énergie électrique stockée dans un condensateur à l'énergie potentielle d'un étalon de masse dans un champ gravitationnel. Il suggère aussi de faire le point, à la prochaine session du CCM, sur les expériences en cours susceptibles de déboucher sur un remplacement de la définition actuelle du kilogramme.

M. Quinn fait alors savoir que la prochaine CPEM, qui se tiendra à Paris en 1992, comportera une séance consacrée à ce sujet.

Le président demande à M. Gläser s'il propose que soit préparé, pour la prochaine session du CCM, un rapport écrit sur les travaux en cours en vue d'une nouvelle définition du kilogramme. M. Gläser répond que, selon lui, un tel document n'est pas indispensable. Un exposé oral, suivi d'une discussion, lui semble suffisant.

## 7. Composition des groupes de travail du CCM

Le président aborde ensuite la question de la composition des groupes de travail. Le CCM prend acte officiellement de la décision de fusionner les Groupes de travail sur les basses pressions et les très basses pressions en un seul : le Groupe de travail sur les basses pressions.

Les laboratoires membres des deux précédents groupes de travail deviennent automatiquement membres du nouveau groupe. Au cas où un laboratoire membre aurait ainsi deux représentants, il lui sera demandé de choisir lequel sera son représentant au nouveau groupe de travail. M. Tilford en assurera la présidence.

Le président informe les participants qu'il a reçu une lettre du président du Korea Standards Research Institute (KSRI) \*, République de Corée, lettre dans laquelle il est demandé que le laboratoire devienne membre du CCM. M. Bray explique que la décision ne pourra être prise qu'après la prochaine Conférence Générale qui doit se réunir en octobre 1991. Entre temps, il demande aux présidents des groupes de travail d'inviter le KSRI à participer aux réunions futures.

Mme Plassa annonce que, à la demande du NIM, ce laboratoire deviendra membre du Groupe de travail sur les étalons de masse.

## 8. Questions diverses

Le président rappelle aux délégués qu'il présentera au CIPM le rapport de cette session du CCM, en s'appuyant sur ce qu'aura rédigé le rapporteur.

Le texte final des Recommandations G 1 (1991) et G 2 (1991) est approuvé.

Le président souligne que le CCM se réunit habituellement tous les trois ans. La troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme sera probablement terminée d'ici à la fin de 1992, et le président demande aux délégués s'ils souhaitent se réunir d'ici à deux ans pour en étudier les résultats définitifs. Il est convenu à l'unanimité de réunir le CCM dès que possible après la fin de la troisième vérification, de préférence au printemps de 1993, ou en septembre si cela est nécessaire. Le président explique que la date définitive sera fixée par le CIPM.

L'ordre du jour étant épuisé, le président remercie les délégués pour leur participation et clôt la quatrième session du CCM.

23 septembre 1991

---

\* Depuis le 17 octobre 1991, le Korea Standards Research Institute (KSRI) a pris le nom de Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS); il a été précisé que le KRISS continuerait à assumer tous les engagements officiels pris par le KSRI.

**Recommandations  
du Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées  
présentées  
au Comité international des poids et mesures \***

Masse volumique de l'air

RECOMMANDATION G 1 (1991)

Le Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées,  
*considérant* que

— en 1981 le Comité international des poids et mesures (CIPM) a adopté la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide, proposée par le CCM,

— cette formule comprenait un certain nombre de constantes et paramètres dont les valeurs étaient spécifiées,

— depuis 1981 les valeurs de plusieurs de ces constantes et paramètres sont mieux connues, en particulier qu'une meilleure valeur de la constante des gaz a été recommandée par CODATA en 1986 et que le CIPM a adopté l'Échelle internationale de température de 1990,

*recommande* que le texte adopté en 1981 soit modifié pour tenir compte de ces changements.

---

\* Ces deux recommandations ont été approuvées par le CIPM à sa 80<sup>e</sup> session (1991).

Masse volumique du mercure

RECOMMANDATION G 2 (1991)

Le Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées,

*considérant* que

— l'incertitude sur la masse volumique du mercure est le facteur le plus important qui contribue à l'incertitude des mesures les plus exactes de pression au voisinage de 100 kPa,

— la masse volumique du mercure peut varier d'une manière significative d'un échantillon à l'autre à cause des variations naturelles de composition isotopique,

— les comparaisons précises de masse volumique d'échantillons individuels de mercure aussi bien que la détermination de la masse volumique d'échantillons de référence de mercure restent une tâche importante pour la métrologie,

— les exigences continuent de croître, pour les besoins scientifique et industriel, en matière de mesures exactes de pression dans le domaine mentionné ci-dessus,

*recommande* que les laboratoires nationaux maintiennent leurs moyens actuels dans ce domaine et si possible les accroissent dans le but de connaître la masse volumique d'échantillons de mercure avec une incertitude relative caractérisée par un écart-type qui n'excède pas quelques  $10^{-7}$ .

---

---

## ANNEXE G 1

---

### Documents de travail présentés à la 4<sup>e</sup> session du CCM

---

Ces documents de travail peuvent être obtenus dans leur langue originale sur demande adressée au BIPM.

---

Document  
CCM/

- 91-1 PTB (Allemagne). — Recommendation for a correction of a mass-standard for the influence of humidity, by M. Gläser.
  - 91-2 International Comparison in the Pressure Range 20-100 MPa (fourth phase) organized by the High Pressure Working Group.
  - 91-3 Report on the Activity of the Working Group of CCM « Mass Standards » in the year 1989, by M. Plassa.
  - 91-4 Report on the Activities of the CCM « High Pressure » Working Group, Period May 1988 - May 1991, by G. F. Molinar.
  - 91-5 BIPM. — Surface Effects on Pt-Ir Prototype Mass Standards, by T. J. Quinn, A. Picard, R. Davis.
  - 91-6 Report of the « Force » Working Group within the CCM, by M. Peters.
  - 91-7 BIPM. — Simple Method for Measuring the Magnetic Susceptibility of Materials Associated with Precision Weighing Devices, by R. S. Davis.
  - 91-8 BIPM. — Weighing Errors Due to Magnetic Materials, by R. S. Davis.
  - 91-9 NIST (États-Unis d'Amérique). — Updating the Formula for the Equation of State of Moist Air, by R. S. Davis.
  - 91-10 Report of the Working Group on Density, by R. S. Davis.
-



Document  
CCM/

- 91-11 IMGc (Italie). — Results of a Special Corrosion Test on Some Materials Used for Mass Standards, by M. Plassa and A. Torino.
- 91-12 IMGc (Italie). — Preliminary results on steam cleaning of platinum alloy surfaces, by M. Plassa, P. Marcarino and A. Torino.
- 91-13 CCM Working Group « Mass standards » Questionnaire on Secondary and Reference Standards Kilograms.
- 91-14 PTB (Allemagne). — Proposal for a Novel Method of Precisely Determining the Atomic Mass Unit by the Accumulation of Ions, by M. Gläser.
- 91-15 National Testing and Research Institute (Suède). — Air Buoyancy Investigations with an Automatic Kilogram Mass Comparator, Artefact Weights and a Laser Refractometer, by B. Johansson, H. Källgren and L. Pendrill.
- 91-16 Interim Report of Task Group on the Density of Water, by R. Masui.
- 91-17 BIPM. — Comparaison d'étalons de masse de 1 kg avec la balance Mettler HK 1000 MC, par J. Coarasa, J. Hostache et G. Girard.
- 91-18 CCM Medium Pressure Working Group — Chairman's Report, April 1991, by P. R. Stuart.
- 91-19 Report of the Low Pressure Working Group of the CCM, by Ch. Tilford.
- 91-20 BIPM. — La troisième vérification périodique des prototypes nationaux. Résultats partiels, par G. Girard.
- 91-21 Working Group « Mass standards ». Report to CCM on the activity 1988-1991, by M. Plassa.
- 91-22 NIM (Rép. pop. de Chine). — Investigations and Experiments on the Weight with a Density of 8 000 kg/m<sup>3</sup> in China, by Pei Yuji, Sun Ruixian, Wang Qingzhen and Liu Zhenho.
- 91-23 IMGc (Italie). — An alternative estimator for comparison calibrations, by W. Bich.
-

---

FORMULE POUR LA DÉTERMINATION  
DE LA MASSE VOLUMIQUE DE L'AIR HUMIDE  
(1981/1991)

par R. S. DAVIS \*

*Introduction*

Les comparaisons d'étalons de masse dans l'air demandent généralement l'application de corrections de poussée de l'air. Pour effectuer ces corrections, le BIPM et la plupart des laboratoires nationaux utilisent maintenant la même formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide,  $\rho$  [1, 2]. Cette formule fait intervenir la température de l'air, sa pression, son humidité relative (ou la température du point de rosée), sa fraction molaire du dioxyde de carbone et un certain nombre de paramètres considérés comme des constantes.

La formule présentée dans les références [1, 2] est souvent désignée, bien que de manière non officielle, sous le nom de « formule, CIPM-81 » pour indiquer que son usage a été recommandé par le Comité international des poids et mesures en 1981 [1].

Depuis sa publication il y a environ dix ans, la connaissance de l'un des principaux paramètres, la constante molaire des gaz, s'est améliorée. De plus, on dispose maintenant de valeurs plus récentes pour d'autres constantes. C'est pourquoi le Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM), sur la proposition de son Groupe de travail « masse volumique », a estimé, à sa dernière réunion (mai 1991), qu'il serait bon de corriger la valeur de certains paramètres utilisés dans les références [1, 2]. Il a toutefois souligné que la forme de la formule de 1981 et les principes qui ont permis de l'établir demeurent inchangés.

Le CCM a donc proposé que la formule de 1981, modifiée pour tenir compte des nouvelles valeurs de certains paramètres données ci-dessous, soit désignée sous le nom de « Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981/1991) », en bref dans cette note « formule 1981/91 »\*\*. Cette dernière reste valable pour les

---

\* Président du Groupe de travail « masse volumique » du Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM).

\*\* Cette formule a été approuvée par le Comité international des poids et mesures (CIPM) lors de sa 80<sup>e</sup> session (septembre 1991).

domaines de pression, de température, d'humidité relative (ou de température du point de rosée) et de fraction molaire du dioxyde de carbone mentionnés dans les références [1, 2].

Les différences entre les valeurs numériques obtenues à l'aide de la formule de 1981 et de la formule 1981/91 sont minimales. En fait, on peut constater que : (1) les masses volumiques de l'air calculées à l'aide de la formule 1981/91 ne diffèrent pas significativement de celles calculées à partir de la formule de 1981 ; (2) l'incertitude globale qui résulte de la formule 1981/91 n'est pas significativement améliorée par rapport à celle de la formule de 1981. Le changement a été effectué simplement pour que les valeurs des constantes utilisées dans la formule soient les meilleures dont on dispose aujourd'hui.

### 1. La formule de 1981

En bref, la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide de 1981 a la forme suivante :

$$\rho = \frac{pM_a}{ZRT} \left[ 1 - x_v \left( 1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad (1)$$

où  $p$  est la pression,  $T$  la température thermodynamique,  $x_v$  la fraction molaire de la vapeur d'eau,  $M_a$  la masse molaire de l'air sec,  $M_v$  la masse molaire de l'eau,  $R$  la constante molaire des gaz et  $Z$  le facteur de compressibilité.

On admet que  $M_a$  est constante, sauf pour tenir compte des variations locales de la fraction molaire du dioxyde de carbone. On suppose que ces variations sont exactement opposées à celles de la fraction molaire de l'oxygène, ce qui conduit à cette relation :

$$M_a = [28,963 5 + 12,011(x_{\text{CO}_2} - 0,000 4)] \times 10^{-3} \text{ kg/mol} \quad (2)$$

où  $x_{\text{CO}_2}$  est la fraction molaire du dioxyde de carbone.

La fraction molaire de la vapeur d'eau  $x_v$  n'est pas mesurée directement mais déterminée à partir de la mesure soit de l'humidité relative  $h$ , soit de la température  $t_r$  du point de rosée. Dans les deux cas, il est nécessaire de connaître  $p_{\text{sv}}(t)$ , la pression de vapeur d'eau saturante dans l'air humide. Celle-ci est calculée à l'aide de la relation :

$$p_{\text{sv}} = 1 \text{ Pa} \times \exp\left( AT^2 + BT + C + \frac{D}{T} \right). \quad (3)$$

Il est aussi nécessaire de connaître le facteur d'augmentation  $f$  calculé à partir de la relation :

$$f = \alpha + \beta p + \gamma t^2, \quad (4)$$

où  $t$  est la température Celsius.

Rappelons que

$$x_v = hf(p, t) \frac{p_{\text{sv}}(t)}{p} = f(p, t_r) \frac{p_{\text{sv}}(t_r)}{p}.$$

Finalement, le facteur de compressibilité  $Z$  est calculé à l'aide de la relation :

$$Z = 1 - \frac{p}{T} [a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + (b_0 + b_1 t)x_v + (c_0 + c_1 t)x_v^2] + \frac{p^2}{T^2} (d + ex_v^2). \quad (5)$$

Les valeurs des constantes des relations (3) à (5) sont données aux références [1, 2].

### 2. Les changements effectués

#### 2.1. Constante molaire des gaz

La formule (1) fait intervenir la constante molaire des gaz,  $R$ . Depuis la publication des documents [1, 2], CODATA a recommandé une meilleure estimation de  $R$  [3] :

$$R = 8,314 510 (1 \pm 8,4 \times 10^{-6}) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1},$$

qui est, en valeur relative, de  $12 \times 10^{-6}$  supérieure à celle utilisée dans les références [1, 2]. L'incertitude de cette nouvelle estimation est 0,27 fois celle attribuée à la valeur de  $R$  utilisée dans les références [1, 2]. En dépit de cette amélioration sensible, l'incertitude globale de la masse volumique de l'air calculée reste pratiquement la même.

#### 2.2. Température

La température, qui est une variable, intervient explicitement au dénominateur de la formule (1) et implicitement dans le calcul de  $p_{\text{sv}}$ , de  $f$  et de  $Z$  (relations (3) à (5)). Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1990, l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90) [4] a remplacé l'Échelle internationale pratique de température de 1968 (EIP-68) et il est utile d'indiquer quelles sont les incidences de ce changement sur la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide. La formule (1) a été établie en supposant que l'air humide est un gaz

parfait et en effectuant les petites corrections nécessaires pour tenir compte du fait que cela n'est pas tout à fait exact.  $T$  est la température thermodynamique. Les températures sont donc mesurées dans l'EIT-90 car ces températures sont censées être plus proches des températures thermodynamiques correspondantes que celles mesurées dans l'EIPT-68.

Les relations (3) à (5) servant à calculer des corrections relativement mineures, les petits changements introduits par l'EIT-90 (environ 5 mK à 20 °C) sont d'importance secondaire. On a cependant utilisé l'EIT-90 pour recalculer les constantes de ces relations, comme cela est expliqué plus en détail au chapitre suivant.

### 2.3. $f$ , $p_{sv}$ , $Z$

Comme on l'indique dans les références [1, 2], les relations pour le calcul de  $p_{sv}$ ,  $f$  et  $Z$  reposent sur une étude de Greenspan, Wexler et Hyland. Hyland et Wexler ont revu cette étude [5] et nous avons tenu compte de leurs nouveaux résultats. On peut noter que ces résultats dépendent de  $R$  et de  $T$ . Les auteurs, anticipant le remplacement de l'EIPT-68, ont montré comment il était possible de convertir leurs résultats dans une échelle de température différente. La valeur de  $R$  utilisée en [5] est suffisamment proche de la valeur actuellement recommandée par CODATA [3] pour que leurs résultats ne soient pas affectés par ce changement.

### 3. Nouvelles valeurs des constantes

Les nouvelles valeurs des constantes qui sont introduites dans la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981/1991) sont données au tableau 1, où sont données aussi, à titre de comparaison, les valeurs utilisées dans la formule originale de 1981. On peut noter que, dans le cas du facteur d'augmentation  $f$ , les constantes ne sont pas affectées par les nouveaux calculs.

Dans les références [1, 2], la constante principale de la formule finale pour la détermination de la masse volumique de l'air humide est  $M_a/R$ . La valeur de  $M_a$  ne change pas par rapport à celle de 1981 mais celle de  $R$  est maintenant modifiée, comme nous l'avons dit précédemment au chapitre 2.1.

TABLEAU 1

Valeurs des constantes de la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide de 1981 et valeurs corrigées de 1991 recommandées dans ce rapport pour la formule 1981/91.

	1981	1991
Pression de vapeur saturante, $p_{sv}$		
$A/(10^{-5} \text{ K}^{-2})$	1,281 180 5	1,237 884 7
$B/(10^{-2} \text{ K}^{-1})$	- 1,950 987 4	- 1,912 131 6
$C$	34,049 260 34	33,937 110 47
$D/(10^3 \text{ K})$	- 6,353 631 1	- 6,343 164 5
facteur d'augmentation, $f$		
$\alpha$	1,000 62	1,000 62
$\beta/(10^{-8} \text{ Pa}^{-1})$	3,14	3,14
$\gamma/(10^{-7} \text{ K}^{-2})$	5,6	5,6
facteur de compressibilité, $Z$		
$a_0/(10^{-6} \text{ K Pa}^{-1})$	1,624 19	1,581 23
$a_1/(10^{-8} \text{ Pa}^{-1})$	2,896 9	- 2,933 1
$a_2/(10^{-10} \text{ K}^{-1} \text{ Pa}^{-1})$	1,088 0	1,104 3
$b_0/(10^{-6} \text{ K Pa}^{-1})$	5,757	5,707
$b_1/(10^{-8} \text{ Pa}^{-1})$	- 2,589	- 2,051
$c_0/(10^{-4} \text{ K Pa}^{-1})$	1,929 7	1,989 8
$c_1/(10^{-6} \text{ Pa}^{-1})$	- 2,285	- 2,376
$d/(10^{-11} \text{ K}^2 \text{ Pa}^{-2})$	1,73	1,83
$e/(10^{-8} \text{ K}^2 \text{ Pa}^{-2})$	- 1,034	- 0,765
constante des gaz, $R$		
$R/(\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1})$	8,314 41	8,314 510
constante principale, $M_a(x_{\text{CO}_2} = 0,000 4)/R$ , dans la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide		
$M_a R^{-1}/(10^{-3} \text{ kg K J}^{-1})$	3,483 53	3,483 49

### 4. Effet des changements

Il est dit dans l'introduction que les différences entre la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide de 1981 et la formule 1981/91 sont minimes. Le tableau 2 le montre en comparant les résultats obtenus avec les paramètres de 1981 et avec ceux de 1981/91 donnés au tableau 1. Pour ces calculs, la fraction molaire du dioxyde de carbone est supposée égale à 0,000 4 et l'EIT-90 est utilisée dans tous les cas. Dans ces exemples, on a choisi arbitrairement l'humidité relative plutôt que la température du point de rosée.

Exemples comparant les résultats obtenus à l'aide de la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981) et de la formule 1981/91. La masse volumique de l'air  $\rho$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ), la pression de vapeur saturante  $p_{sv}$  (Pa), et le facteur de compressibilité  $Z$  sont calculés en fonction de la pression  $p$ , de la température  $t$  et de l'humidité relative  $h$ . Dans tous les calculs, on utilise l'EIT-90. Dans ces exemples, la fraction molaire du dioxyde de carbone a été prise égale à 0,000 4.

	1981	1981/91
$p = 100\ 000$ Pa		
$t = 20$ °C		
$h = 0,50$		
$\rho$	1,183 507	1,183 472
$p_{sv}$	2 338,6	2 339,2
$Z$	0,999 603	0,999 619
$p = 110\ 000$ Pa		
$t = 20$ °C		
$h = 0,10$		
$\rho$	1,306 622	1,306 582
$p_{sv}$	2 338,6	2 339,2
$Z$	0,999 590	0,999 608
$p = 100\ 000$ Pa		
$t = 15$ °C		
$h = 0,90$		
$\rho$	1,202 443	1,202 408
$p_{sv}$	1 705,3	1 705,7
$Z$	0,999 539	0,999 555
$p = 60\ 000$ Pa		
$t = 25$ °C		
$h = 0,50$		
$\rho$	0,694 179	0,694 162
$p_{sv}$	3 168,8	3 169,8
$Z$	0,999 759	0,999 769

Dans tous les exemples donnés au tableau 2, la masse volumique de l'air calculée à partir des valeurs des constantes de la formule 1981/91 est inférieure en valeur relative d'environ  $3 \times 10^{-5}$  à celle obtenue à partir des valeurs de 1981. Alors que ces différences se situent à l'intérieur du domaine d'incertitude attribué à cette formule, elles sont appréciables si l'on considère la précision des valeurs portées dans les tableaux des références [1, 2]. On peut noter que le changement sur la valeur calculée de la masse volumique de l'air dû à l'introduction de la valeur la plus récente de  $R$  de CODATA est sensiblement égal au changement dû aux nouvelles valeurs de  $Z$ .

## 5. Propositions

Compte tenu des considérations exposées ci-dessus, le CCM a soumis les propositions suivantes au CIPM, qui les a approuvées lors de sa 80<sup>e</sup> session (septembre 1991).

1. La forme de toutes les relations citées dans les références [1, 2], qui entrent dans le calcul de la masse volumique de l'air humide, reste inchangée.
2. Les valeurs de certaines constantes citées dans les références [1, 2] doivent être corrigées, comme cela est indiqué au tableau 1 de ce document.
3. La formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide, dont la forme est donnée dans les références [1, 2], mais avec les valeurs modifiées des constantes du tableau 1 de ce document, doit être désignée sous le nom de « Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981/1991) ».
4. L'EIT-90 doit être utilisée dans la formule 1981/91.
5. L'incertitude globale pour la masse volumique de l'air calculée à l'aide de la formule 1981/91 est pratiquement égale à celle obtenue à l'aide de la formule de 1981.

*Remerciements.* Nous tenons à remercier P. Carré, retraité du BIPM, qui a effectué les calculs et les analyses pour établir la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981/1991).

## Bibliographie

- [1] Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981), *BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1981, **49**, C1-C15.
- [2] GIACOMO P., Equation for the determination of the density of moist air (1981), *Metrologia*, 1982, **18**, 33-40.
- [3] COHEN E. R., TAYLOR B. N., The 1986 adjustment of the fundamental physical constants, *CODATA Bulletin*, novembre 1986, n° 63 (Per-gamon, Oxford/New York).
- [4] PRESTON-THOMAS H., The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), *Metrologia*, 1990, **27**, 3-10.

[5] HYLAND R. W., WEXLER A., Formulations for the thermodynamic properties of the saturated phases of  $H_2O$  from 173.15 K to 473.15 K, *ASHRAE Trans.*, 1983, **89**, Part IIA, 500-519.

HYLAND R. W., WEXLER A., Formulations for the thermodynamic properties of dry air from 173.15 K to 372.15 K, at pressures to 5 MPa, *ASHRAE Trans.*, 1983, **89**, Part IIA, 520-535.

---

**COMITÉ CONSULTATIF  
POUR LA MASSE ET LES GRANDEURS APPARENTÉES**

**MEETING OF 1991**

---

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

To make its reports and those of its various Comités Consultatifs more widely accessible the Comité International des Poids et Mesures has decided to publish an English version of these reports. Readers should note that the official record is always that of the French text. This must be used when an authoritative reference is required or when there is doubt about the interpretation of the text.

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

Afin de faciliter l'accès à ses rapports et à ceux des divers comités consultatifs, le Comité international des poids et mesures a décidé de publier une version en anglais de ces rapports. Le lecteur doit cependant noter que le rapport officiel est toujours celui qui est rédigé en français. C'est le texte français qui fait autorité si une référence est nécessaire ou s'il y a doute sur l'interprétation.

---

## THE BIPM AND THE CONVENTION DU MÈTRE

---

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

BIPM has its headquarters near Paris, in the grounds (43 520 m<sup>2</sup>) of the Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) placed at its disposal by the French Government; its upkeep is financed jointly by the Member States of the Convention du Mètre\*.

The task of BIPM is to ensure world-wide unification of physical measurements; it is responsible for:

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

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

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

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

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

The activities of BIPM, which in the beginning were limited to the measurements of length and mass and to metrological studies in relation to these quantities, have been extended to standards of measurement for electricity (1927), photometry (1937), ionizing radiations (1960) and to time scales (1988). To this end the original laboratories, built in 1876-1878, were enlarged in 1929; new buildings were constructed in 1963-1964 for the ionizing radiation laboratories, in 1984 for the laser work and in 1988 a new building for a library and offices was opened.

---

\* As of 31 December 1991 forty-seven States were members of this Convention: Argentina (Rep. of), Australia, Austria, Belgium, Brazil, Bulgaria, Cameroon, Canada, Chile, China (People's Rep. of), Czechoslovakia, Denmark, Dominican Republic, Egypt, Finland, France, Germany, Hungary, India, Indonesia, Iran, Ireland, Israel, Italy, Japan, Korea (Dem. People's Rep. of), Korea (Rep. of), Mexico, Netherlands, New Zealand, Norway, Pakistan, Poland, Portugal, Romania, Spain, South Africa, Sweden, Switzerland, Thailand, Turkey, U.S.S.R., United Kingdom, U.S.A., Uruguay, Venezuela, Yugoslavia.



Some forty physicists or technicians are working in the BIPM laboratories. They are mainly conducting metrological research, international comparisons of realizations of units and the checking of standards used in the above-mentioned areas. An annual report published in *Procès-Verbaux des séances du Comité International* gives the details of the work in progress.

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

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

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

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

- *Comptes rendus des séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures*;
- *Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures*;
- *Sessions des Comités Consultatifs*;
- *Recueil de Travaux du Bureau International des Poids et Mesures* (this collection for private distribution brings together articles published in scientific and technical journals and books, as well as certain work published in the form of duplicated reports).

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

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

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

## Comité International des Poids et Mesures

<i>Secretary</i>	<i>President</i>
J. Kovalevsky	D. Kind

### MEMBERS

#### OF THE

#### COMITÉ CONSULTATIF

#### POUR LA MASSE ET LES GRANDEURS APPARENTÉES

#### *President*

A. BRAY, Member of the Comité International des Poids et Mesures, Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Turin.

#### *Members*

BUREAU NATIONAL DE MÉTROLOGIE, Paris: Institut National de Métrologie [INM] du Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris.

ČESKOSLOVENSKÝ METROLOGICKÝ ÚSTAV [CSMU], Bratislava.

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield.

D. I. MENDELEYEV INSTITUTE FOR METROLOGY [VNIIM], Leningrad.

ISTITUTO DI METROLOGIA G. COLONNETTI [IMGC], Turin.

NATIONAL INSTITUTE OF METROLOGY [NIM], Beijing.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY [NIST], Gaithersburg.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [NPL], Teddington.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA [NRC], Ottawa.

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY [NRLM], Tsukuba.

OFFICE FÉDÉRAL DE MÉTROLOGIE [OFM], Wabern.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [PTB], Braunschweig and Berlin.  
VAN SWINDEN LABORATORIUM [VSL], Delft.

The Director of the Bureau International des Poids et Mesures  
[BIPM], Sèvres.

—

AGENDA  
for the 4th meeting

---

1. Opening of the meeting.
  2. Designation of a rapporteur.
  3. Approval of the agenda.
  4. Third periodic verification of national prototypes.
  5. Reports of the Mass Working Groups :
    - a) Mass standards,
    - b) Density.
  6. Report of the Force Working Group.
  7. Reports of the Pressure Working Groups :
    - a) High pressures,
    - b) Medium pressures,
    - c) Low pressures,
    - d) Very low pressures.
  8. Development of prototype balances.
  9. Present status and future work on a possible new definition of the kilogram.
  10. Working Group membership.
  11. Miscellaneous :
    - a) Report to the CIPM and Recommendations,
    - b) Future meeting,
    - c) Any other business.
- 

---

REPORT  
OF THE  
COMITÉ CONSULTATIF  
POUR LA MASSE ET LES GRANDEURS APPARENTÉES  
(4th Meeting — 1991)  
TO THE  
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

by R. S. DAVIS, Rapporteur

---

The Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM) held its fourth meeting at the Bureau International des Poids et Mesures, at Sèvres, on Thursday 30 and Friday 31 May, 1991.

The following were present :

A. BRAY, member of the CIPM, President of the CCM.

The delegates from member laboratories :

Bureau National de Métrologie, Paris: Institut National de Métrologie [INM] du Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris (C. MORILLON).

Československý Metrologický Ústav [CSMU], Bratislava (R. SPURNY).

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield (E. C. MORRIS).

D. I. Mendeleev Institute for Metrology [VNIIM], Leningrad (A. P. SCHELKINE).

Istituto di Metrologia G. Colonnetti [IMGC], Turin (M. PLASSA, G. MOLINAR).

National Institute of Metrology [NIM], Beijing (Changyan SHI, Ruixian SUN).

National Institute of Standards and Technology [NIST], Gaithersburg (R. S. DAVIS, C. R. TILFORD).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (R. WILSON, P. R. STUART).

National Research Council of Canada [NRC], Ottawa (G. D. CHAPMAN).

National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Tsukuba (R. MASUI).

Office Fédéral de Métrologie [OFM], Wabern (W. BEER).  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig and  
Berlin (M. GLÄSER, M. PETERS, N. KAISER).  
Van Swinden Laboratorium [VSL], Delft (R. MUIJLWIJK).

The Director of the Bureau International des Poids et Mesures  
[BIPM] (T. J. QUINN).

Invited guests :

L. R. PENDRILL, Statens Provningsanstalt [SP], Borås.  
Korea Standards Research Institute [KSRI], Taejon, (Kwang-Hua  
CHUNG, Jin-Yeol Do).

Also attending the meeting :

Bureau International de Métrologie Légale [BIML] (Å. THULIN)  
(observer).  
P. GIACOMO, Director emeritus of the BIPM; J. BONHOURE,  
M.-J. COARASA, G. GIRARD and A. PICARD [BIPM].

## 1. Opening of the Meeting

The President opens the meeting by welcoming those present. The delegates, invited guests, and other attendees are introduced. Mr Davis is nominated as rapporteur. After noting that there will be no report from the Working Group on Very Low Pressures, the President asks members of this Working Group and the Working Group on Low Pressures to speak among themselves, during breaks in the proceedings, about whether they would wish to consolidate the two groups. The agenda is adopted.

## 2. Third periodic verification of national prototypes

The President calls on Mr Girard to report on the progress of the third periodic verification of national prototypes. Mr Girard begins by explaining that the third verification has been divided into two main phases. The first, now completed, was a study of the effects of cleaning and washing on the international prototype and its six official copies (témoins) and the determination of the mass of the official copies with respect to the international prototype. This work has been described in document CCM/91-3 as well as in the report of the *ad hoc* meeting of Working Group on Mass Standards which was held on 2-3 November

1989 at the BIPM. The second phase is the recalibration of the national prototypes themselves. This task, though not completed, is progressing well. Preliminary results are described in document CCM/91-20.

*Effects of cleaning and washing on the international prototype, its six official copies and other prototypes*

In order to give a complete picture of the progress to date of the third verification, Mr Girard now presents a brief summary of the first phase. In addition to the international prototype and its six official copies, the BIPM has also made use of copies Nos. 25, 9, and 31. Copy No. 25 (reserved for special use) is similar in quality to the official copies but, since it is not an official copy, it is always available for use by the BIPM. The two other copies, Nos. 9 and 31, are kept in the mass laboratory of the BIPM and are used as working standards. Mr Girard mentions in passing that the surface of copy No. 31 is scratched in many places. Nevertheless, the copy is still useful. The BIPM recently has added a fourth copy, No. 67, manufactured by the diamond-turning process.

For the cleaning studies of the first phase of the third verification, Nos. 9 and 31 were not cleaned and so served as the reference standards. Mr Girard now presents a graph showing the effects of two successive cleanings and washings on the mass of the international prototype and its six official copies (with respect to Nos. 9 and 31). He infers from the graph that about 80 % of the surface contamination is removed by a single cleaning and washing. Thus he concludes that two cleaning and washing procedures are sufficient to remove all non-negligible contamination.

Mr Girard next discusses the loss in mass upon cleaning and washing of the international prototype, its official copies, and the national prototypes studied in the fifteen years prior to the third verification. The loss in mass is shown in graphical form as a function of time since the previous cleaning and washing. With few exceptions the points lie about a straight line with slope  $-1 \mu\text{g}$  per year. Mr Girard points out that even copy No. 13, which had not been cleaned in about 100 years, falls on the line. It is noteworthy that extrapolated to time equal zero the line indicates a small but finite loss in mass. This implies that the gain in mass from surface pollution proceeds at rate significantly greater than  $1 \mu\text{g}$  per year during the first months after cleaning and washing.

*Evolution in mass after cleaning and washing the prototypes*

Thus Mr Girard was led to study the evolution in mass immediately after cleaning of four prototypes: the international prototype, and Nos. 7, 67, and 73. Copy No. 73, like copy No. 67, was manufactured

relatively recently by the diamond-machining process. The study was limited to four standards because the carousel of the NBS-2 balance contains places for six standards (four under test and two reference standards). Mr Girard presents a graph of the results which, indeed, shows a relatively rapid gain in mass for each standard within the first weeks after cleaning and washing.

*Evolution of the mass of the official copies and of prototype No. 25 since 1889*

To conclude his summary of the first phase of the third verification, Mr Girard shows a graph of the evolution over time of the mass of the six official copies and of No. 25 with respect to the international prototype. The origin of the time axis is 1889. He points out that there are no pertinent results from the first verification (1910) because the international prototype was not used. In 1946, at the time of the second verification, it was already noted that official copies Nos. 8(41), 32, and 7 had gained mass with respect to the international prototype and that official copy K1, made from the same melt as the international prototype, appeared to have lost mass. Mr Girard also points out that official copies No. 43 and No. 47 were fabricated shortly before the second verification and this was their initial calibration. Phase one measurements of the third verification show that the trend of the official copies to gain mass with respect to the international prototype has continued. Official copy K1 has also increased in mass with respect to the international prototype, essentially returning to its assigned mass of 1889.

*Mise en pratique of the definition of the kilogram*

Mr Girard recalls that after the first phase was completed, the CIPM decided at its 1989 meeting that, for purposes of the third periodic verification, the mass of the international prototype immediately after cleaning and washing would be taken as the reference. This mass is to be inferred by extrapolation. The CIPM also made it clear that this decision did not in any way constitute a redefinition of the kilogram. The CIPM further asked the president of the CCM to convene the Working Group on Mass Standards to advise whether the BIPM should, during the second phase of the verification, also apply the traditional methods of cleaning and washing to the national prototypes. The Working Group met in November of 1989 to consider this question and advised that the same methods of cleaning and washing be applied to the national prototypes.

*Verification of the national prototypes*

With this as background, Mr Girard proceeds with his interim report of the second phase: measurements of the national prototypes themselves. He has received thirty-five national prototypes. In addition, Mr Girard intends to include new prototypes that have been ordered from the BIPM as well as prototypes that will be kept as stock. This brings the total number of artefacts to be measured to more than forty.

The national prototypes to be measured have been divided into groups of ten according to their order of arrival at the BIPM. The mass of each national prototype is determined in the state in which it was received by the BIPM. It is then cleaned and washed twice and its mass is determined again. After the second cleaning and washing, the mass is determined with reference to official copies No. 8(41) and No. 32. The latter are also cleaned and washed at about the same time as the second cleaning and washing of the national prototypes. Two groups of ten national prototypes have been studied in this way.

Mr Girard shows a graph (figure 1 of document CCM/91-20) of how the effect of cleaning and washing of the twenty national prototypes compares with the graph of previous results (international prototype and its six official copies) which he showed in his introduction. In general the new points also lie about the same line with slope of  $-1 \mu\text{g}$  per year. There are exceptions but Mr Girard explains that, aside from the simple time dependence shown in the graph, the effects of cleaning and washing also depend on the surface condition of the prototype and on the cleanliness of the atmosphere in which it was stored.

Mr Girard now presents a graph (figure 2 of document CCM/91-20) which shows the evolution in time of the twenty national prototypes with respect to the international prototype. He has not identified the individual copies because the results are still subject to correction. Nevertheless, he expects these corrections to be so small that the general conclusions should not be altered. He notes that one of the older prototypes has quite remarkably increased its mass by about  $100 \mu\text{g}$  since 1948. He also points out that the group of prototypes manufactured from 1946 on is gaining mass at a faster rate than the older group.

To help interpret the results of this last graph, Mr Girard makes two additional points: (1) the newest copies were compared only with the working standards of the BIPM and so their initial mass is somewhat less certain than the others; (2) of the new diamond-machined prototypes, the mass seems more stable for some than for others. These changes in mass with respect to time are not very well determined, however, given the uncertainties in the mass determinations and the relatively short existence the new prototypes.

Verification of the remaining national prototypes is continuing.

*Discussion*

Mr Girard's report concluded, a lively discussion of the preliminary results now ensues. Prof. Bray asks about the reproducibility in mass of prototypes that are cleaned and washed by the BIPM method and also whether there is any correlation between surface analysis and observed behaviour. Mr Girard says that his studies of the BIPM method of cleaning and washing demonstrate that prototypes can be reproducibly cleaned and washed to within about 1  $\mu\text{g}$ . As yet, there are no surface studies which help to interpret the observed results but there is considerable work being carried out by members of the Working Group on Mass Standards (*see* page G 55).

Referring to the final graph of the presentation,

— Mrs Plassa wonders if changes in mass might be due to trapped hydrogen which is outgassing at different rates. If so, might not the changes in mass with respect to time be correlated with the measured density of the prototype?

— Mr Chapman adds that prototype No. 50 is among the least dense of the national prototypes and it does not behave reproducibly upon cleaning. This variability, however, seems random rather than monotonic.

— Mr Quinn suggests that heating the prototypes during the washing process may accelerate gas diffusion.

— Mr Davis points out that relatively early in the history of the BIPM, a prototype was heated to 100 °C in dry air for a full year without suffering a significant loss in mass\*. The precision of the experiment may not have been adequate for present levels of interest, however.

Mr Girard replies that, as regards the density of the prototypes, in 1965 he was able to study prototypes at both density extremes. No unusual behavioural differences were observed. Mr Girard hastens to add, however, that the measurements were carried out with the Ruelprecht balance, which at that time had a standard deviation an order of magnitude greater than that of the NBS-2 balance. Since 1965, the evolution in mass of these prototypes has been normal.

To conclude the discussion, Mr Girard recalls that the BIPM method of cleaning and washing has now been documented in a report containing a complete written description (in French and English) accompanied by a photographic record of the steps involved.

---

\* L'invariabilité de l'unité de masse assurée par le kilogramme prototype, In *La création du Bureau international des Poids et Mesures et son œuvre*, Guillaume Ch.-Ed. ed., 1927, 293-304.



### 3. Reports of the Working Groups

The President now asks the chairmen of the Working Groups for their reports beginning with the Working Group on Mass Standards.

#### 3.1. Mass standards

Mrs Plassa opens her presentation by referring the delegates to her written reports of the activities of the Working Group (documents CCM/91-3 and CCM/91-21). The latter contains nine annexes describing research activities in the member laboratories. Nine additional reports pertinent to the interests of the Working Group were submitted as CCM documents. The Working Group held a meeting on 28-29 May 1991 during which these and other topics of interest were discussed. To organize the diversity of projects into a coherent presentation, Mrs Plassa divides the research activities of the Working Group into five categories: cleaning effects, humidity effects, corrosion and other surface effects, diverse studies, and international comparisons of secondary standards.

##### *Cleaning effects*

The NRLM studied the increase in mass of two prototypes after cleaning and washing (Annex 7, document CCM/91-21). Mrs Plassa summarizes the results by noting that they are in qualitative agreement with those obtained at the BIPM. Quantitatively, the initial increase in mass appears to be more rapid in the NRLM data. The NRLM conducted a second study using FT-IR and XPS techniques to monitor the presence of organic carbon on a platinum-iridium surface. They found that solvent cleaning removes about half the carbon initially present and that the carbon level returns to its initial value in a matter of hours.

At the IMGIC (document CCM/91-12), strips of platinum alloy were first cleaned with a solvent and then steamed for long periods of time in a special apparatus similar to that used in cleaning the elements of platinum-resistance thermometers. Eventually, individual droplets are no longer seen on the surface of the platinum and this is taken as a sign of cleanliness. The change in mass of the test sample was also monitored and Mrs Plassa notes that it stops losing mass well before surface wettability is reached.

Work at the PTB (Annex 8, document CCM/91-21) has compared the efficacy of two cleaning techniques for stainless-steel standards. One technique is that of cleaning and washing by the method used by the

BIPM for platinum-iridium prototypes. The second technique employs a Soxhlet apparatus to expose the sample to ethanol vapours. The techniques were found to be equally effective at removing surface contamination that was deliberately introduced by the researchers.

The NPL is using XPS techniques (Annex 6, document CCM/91-21) to study surfaces with the hope of finding correlations with the PTB gravimetric results.

#### *Humidity effects*

Mrs Plassa notes that two documents discussing the effects of changes in humidity on the mass of standard artefacts have been submitted to the CCM. A study at the BIPM (document CCM/91-5) has found surprisingly small changes in mass as a function of humidity. The artefacts studied were manufactured by the diamond-machining process.

Document CCM/91-1 takes into account data obtained at three laboratories (PTB, VNIIM, NRLM) in order to arrive at an equation which represents the humidity effects one might expect when comparing platinum-iridium prototypes with secondary standards of stainless steel.

#### *Corrosion and other surface effects*

Mrs Plassa, referring to document CCM/91-11, describes studies on stainless steels and superalloys done at the IMGCC. A comparison is made of the effects of electrochemical corrosion and corrosion caused by flowing air. The two methods give similar results. A surprising finding is that the corrosion resistance of AISI 310 stainless steel was inferior to that of AISI 304 although the latter contains relatively less chromium and nickel. A definitive conclusion about these alloys cannot yet be made, Mrs Plassa continues, because of the possibility that the samples studied are not representative.

Additional surface studies are mentioned in Annexes 2 and 6 of document CCM/91-21.

Mrs Plassa also refers the delegates to document CCM/91-22 which describes studies being done at the NIM on two alloys, one copper based and the other predominantly nickel and chrome. Both have densities very near to  $8\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

#### *Diverse topics*

Mrs Plassa reports that two laboratories have designed devices that can measure the magnetic susceptibility of mass standards. An apparatus developed at the BIPM is described in document CCM/91-7. The description of a similar apparatus under construction at the PTB can be found in Annex 8 of document CCM/91-21.

Finally, Mrs Plassa mentions that two laboratories reported experiments to determine the density of air directly. At the PTB, an apparatus, described very briefly in document CCM/91-3 and more completely in a recent article in *Metrologia*\*, was used to measure air density to a relative uncertainty of about  $5 \times 10^{-5}$ . Work at the VNIIM (Annex 3, document CCM/91-21) is progressing along similar lines.

*International comparisons of secondary standards*

Bilateral mass comparisons at the kilogram level have been carried out with good results in eastern Europe, as mentioned in Annex 3 of document CCM/91-21. Annex 9 of the same document describes work in western Europe to compare kilogram submultiples. In the latter case, participants agreed to within 2 parts in  $10^7$  down to a nominal mass of 10 g.

Mrs Plassa now describes the basic features, worked out earlier in the week at the meeting of the Working Group, of an international comparison of 1 kg secondary standards. A preliminary questionnaire (document CCM/91-13) had revealed widespread interest in undertaking this project.

The international comparison of 1 kg secondary standards is scheduled to begin at the end of 1993. This allows time for the completion of the third verification and for the participating national laboratories to recalibrate their secondary standards. The BIPM has agreed to be pilot laboratory. Two transfer standards of Nicral D will be supplied by the VSL and an additional two transfer standards of a special stainless steel will be supplied by the CSMU. The BIPM will make use of two of its own Nicral D standards as references. The Working Group has decided on a «petal» design for the international comparisons so that pairs of transfer standards will be sent only to three or four national laboratories before returning to the BIPM for verification.

The Working Group has discussed a number of preliminary details regarding this project and has identified work which should be done prior to the start of the international comparisons in 1993.

This concludes Mrs Plassa's report.

Prof. Bray, referring to document CCM/91-1, asks Mr Gläser to clarify two points: why 45 % relative humidity was chosen as the reference value; and whether the document should be taken as a recommendation for the correction of relative humidity effects between stainless steel and platinum standards. Mr Gläser replies to the first question by saying that 45 % is simply a convenient value, taking into consideration that data from three different laboratories were averaged. As to the second point, Mr Gläser asserts that the formula which he

---

\* GLÄSER M., SCHWARTZ R., MECKE M., Experimental Determination of Air Density Using a 1 kg Mass Comparator in Vacuum, *Metrologia*, 1991, **28**, 45-50.

has derived should be considered as advisory. He suggests that there is a need for more data before a definitive recommendation can be made.

The President now calls upon Mr Davis to present the report of the Working Group on Density.

### 3.2. Density

Mr Davis refers to his written report (document CCM/91-10) which summarizes activities of the Working Group and its members laboratories. The Working Group held a meeting earlier in the week, on 28 May 1991.

An international comparison of solid density artefacts, which was organized by the Working Group and which was essentially completed at the time of the last CCM meeting, has been published in *Metrologia* \*.

#### *Compilation of a table for water density*

The major project of the Working Group continues to be the compilation of a recommended table for water density based on modern data. At the time of the last CCM meeting, the job of producing such a table was given to a Task Group consisting of representatives from the BIPM, CSIRO, and NRLM. Mr Masui has written an interim report on behalf of the Task Group (document CCM/91-16). An expanded version of this report, containing numerous appendices, was distributed to Mr Davis and to the other members of the Task Group.

The mathematical description of water densities has been divided into two parts. The first part is a formula for the relative thermal expansion of water throughout a range of temperatures (0 °C to 40 °C for example). The second part is the assignment of absolute density at a temperature of reference (the temperature of maximum density, for example). Mr Masui's analysis of thermal expansion data obtained at the CSIRO and NRLM shows agreement, expressed as a fraction, to within  $1 \times 10^{-6}$  through a temperature range of from 0 °C to 40 °C. As regards the absolute density of water at the reference temperature, the disagreement between the two laboratories is about  $3 \times 10^{-6}$ . Work is continuing to see if this discrepancy can be resolved. In any event, Mr Masui and the other members of the Task Group believe that a final draft for a table of water density can be completed in 1992.

Mr Davis mentions that, at the Working Group meeting, Mr Bettin (PTB) reported that his laboratory is preparing to measure the density of water. Mr Bettin anticipates a delay of two to three years before final results are obtained.

---

\* Davis R. S., Report of Density Intercomparisons Undertaken by the Working Group on Density of the CCM, *Metrologia*, 1990, 27, 139-144.

*Air density*

Next, Mr Davis turns to the topic of air density. Direct determination of air density at the PTB (already mentioned in Section 3.1, page G 57) has achieved an accuracy of  $5 \times 10^{-5}$  and is in good agreement with the 1981 equation for the determination of the density of moist air. Mr Gläser reported briefly to the Working Group on these experiments. Preliminary work in the same area was also reported by the CSMU and the NPL.

Additional studies of air density are contained in document CCM/91-15. This describes experimental work at the Statens Provningsanstalt (SP) in which changes in the density of air within a balance case is monitored by three techniques: calculation from the 1981 equation; direct measurement of the buoyant force on artefacts; measurement of the refractive index of air. The last technique, as adapted for mass measurement, has been developed at the SP over the past several years.

*Equation for the determination of the density of moist air (1981/1991)*

Finally, Mr Davis draws the delegates' attention to document CCM/91-9, a look after ten years at the 1981 equation for the determination of the density of moist air. Mr Davis mentions that he was greatly aided in this study by Mr Carré, one of the principal contributors to the development of the 1981 equation and now retired from the BIPM.

The original publication in the *Procès-Verbaux du CIPM* \* and in *Metrologia* \*\* of the 1981 equation is recalled. Mr Davis points out that, while the form of the equations in that publication are still valid, an improved estimate of the molar gas constant  $R$  has since been recommended by CODATA. In addition, a reanalysis of auxiliary data has led to slight changes in calculations of the saturation vapour pressure  $p_{sv}$  and of the compressibility factor  $Z$ . Mr Davis adds that since 1 January 1990 temperature has been measured in terms of the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). This change does not affect the 1981 equation except to provide an improved measurement of the thermodynamic temperature  $T$  which appears in its denominator.

The air densities which one would calculate by using the 1981 equation, modified to take the above changes into account, are within the uncertainty of the original equation. In addition, the overall uncertainty of the modified equation is not significantly reduced. Mr Davis reports that the Working Group recommends, nevertheless, that the above changes be made in order that the resulting equation reflect the present state of our knowledge; especially as regards the molar gas constant.

\* *BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1981, **49**, C1-C15.

\*\* Equation for the Determination of the Density of Moist Air (1981), *Metrologia*, 1982, **18**, 33-40.

The delegates agree with this position but there is considerable discussion over the best way to implement it. Finally, it is decided that Mr Davis should write a document to be published in the proceedings of this meeting in which the proposed changes to the 1981 equation are clearly stated. The delegates wish Mr Davis to emphasize that the basic form of the equation remains the same but that improved estimates of certain constant parameters contained in the equation are now available. The delegates further agree to recommend to the CIPM that the text of the 1981 equation for the density of moist air be modified to take account of the changes discussed above (*see* Recommendation G 1 (1991), page G 73). It is suggested that, subject to approval of Recommendation G 1 (1991) by the CIPM, the modified equation be referred to as the 1981/91 equation for the determination of the density of moist air.

This concludes Mr Davis's report and the President now calls upon Mr Peters to present the report of the Working Group on Force.

### 3.3. Force

Mr Peters begins by explaining that the Working Group held its meeting on 16-17 October 1990 in Braunschweig and that document CCM/91-6 is a report of this meeting. He recalls that the Working Group was previously concerned with force measurements to 1 MN and that projects carried out in this region have been very successful.

#### *Higher levels of force*

Since 1988, the Working Group has turned its attention to higher forces. The main subject of the meeting in October 1990 was « Different principles of force standard machines and their long-term stabilities ».

Mr Peters says that above 1 MN there are few deadweight force standard machines in the world and he gives the major technical reasons for this, such as problems with stabilization and reproducible loading. Thus other techniques are often used; mechanical or hydraulic lever systems for example. Mechanical levers have achieved forces up to 3 MN. Mr Peters then mentions hydraulic devices developed in Japan, Germany and the People's Republic of China that multiply force by means of two piston cylinders. A force of as much as 20 MN can be measured with such devices with an uncertainty of about  $1 \times 10^{-4}$ . A recent comparison between the PTB and the NIST agreed to well within this level, Mr Peters says. Such systems have significant technical problems, however, such as vibration and sensitivity to overloading.

Another method of achieving large forces is by using a transducer build-up technique. Mr Peters says that the NPL uses this technique, starting in the kilonewton range and building up to 30 MN, achieving

an uncertainty of about 1/2000. He says it is difficult to attain lower uncertainties because each transducer suffers from problems such as long-term stability. To achieve the lowest possible uncertainty, the transducer must be calibrated every three to four months and must be loaded every few days.

Mr Peters says that the industrial need for high accuracy in measuring large forces is increasing in many countries. Therefore the Working Group intends to compile a report of experiences with these measurements at member laboratories. Taking Germany as an example, Mr Peters goes on to say that there is beginning to be a need for calibrations of forces greater than 20 MN with an uncertainty of  $10^{-3}$  to  $10^{-4}$ .

#### *Long-term stability*

The next meeting of the Working Group, which will be held at the NPL, will focus on the long-term stability of transducers used for large forces. Mr Peters says that, just as the Working Group developed a standard practice for calculating the uncertainty of force machines operating up to 1 MN, there is now a need to develop a uniform practice for calculating the uncertainty of build-up machines.

As a final point Mr Peters states that, in order to help avoid confusion, the Working Group suggests that a uniform nomenclature be used for force machines.

Mr Peters concludes his report by saying that, as in the past\*, the proceedings of the last Working Group meeting will be published by the PTB.

#### *Discussion*

The President thanks Mr Peters for his report. Before entertaining further questions and comments, however, Prof. Bray says that he sees some problems with the proposed nomenclature for force machines. Mr Peters replies that it may, in fact, be desirable to change the proposed nomenclature. The main point in his opinion, however, is that a uniform nomenclature is necessary and the first steps have been taken to achieve it. To a second question from Prof. Bray concerning the overall accuracy of transducers, Mr Peters says that the calibration schedule and the history of the transducer are very important. For instance, taking a transducer out of a machine and replacing it can cause important changes.

As a point of information, Mr Wilson tells the delegates of NPL's plans for calibrating the standard masses which will go into its new 1,2 MN machine. A scheme has been devised to calibrate the 2,5 t

---

\* The complete report of the May 1988 meeting of the Working Group on Force, as well as the technical proceedings, were published in *PTB-Bericht MA-17*, January 1990, 104 pages.

elements to an accuracy of a few parts in  $10^6$ . In addition, NPL has organized an international comparison of mass measurements with three other national laboratories.

Prof. Bray says that the experience of the IMGCC with their 30 kN machine was that the uncertainty is limited not only by its internal masses but also by its geometry. For instance, it was found that height changes as small as 0,1 mm in 5 m were important.

As regards the mass comparisons being organized by the NPL, it is Mr Peters' opinion that significant discrepancies may well be discovered between the participants.

The discussion now completed, the President calls upon Mr Molinar to give the report of the Working Group on High Pressures.

### 3.4. High pressures

The written report of the Working Group is contained in document CCM/91-4. Mr Molinar begins by listing three accomplishments of the Working Group: publication (*BIPM Monographie* 89/1) of the twenty-three papers given at a seminar which was held in May 1988; preparation of a directory of laboratories doing metrology at high pressures (a second edition of the directory is planned for 1992); completion of the fourth and final phase of the international pressure comparisons in liquid media, from 20 MPa to 100 MPa (document CCM/91-2).

#### *Comparisons from 20 MPa to 100 MPa*

As the final phase of the international pressure comparisons terminates a major effort of the Working Group, Mr Molinar reviews the final results which, he says, will be the basis for a publication in *Metrologia*. The international comparisons have been made over a period of ten years with the participation of seventeen laboratories, the LNE acting as the pilot. Participants were required to determine the effective area, throughout the pressure range, of a piston and cylinder used as the transfer standard. These data are then modelled by two parameters: the effective area at low pressure, and the pressure distortion coefficient. Mr Molinar presents the values which have been obtained for these two parameters. He concludes that, in order to improve present capabilities, effort should be put into a better understanding of the pressure distortion coefficient.

#### *Comparison to 1 GPa*

Mr Molinar then proceeds to report the progress of international comparisons being carried out in liquid media up to about 1 GPa. Participating laboratories have been divided into three groups. The first



of the groups, with the LNE as pilot, has begun its comparisons. Measurements will cover the range from 100 MPa to 700 MPa with a possible extension to 1 GPa. The second group, with the VNIIFTRI as pilot, has finished its comparisons. Their results have been published in *BIPM Monographie* 89/1, cited above. The third group has yet to organize multilateral comparisons, although one bilateral comparison has been made.

Multilateral cooperation among European laboratories is also taking place through projects sponsored by EUROMET and the Community Bureau of Reference of the Commission of the European Communities.

Next, Mr Molinar turns to a brief review of work to measure or compute the pressure distortion coefficients of piston-cylinder combinations.

Another area in which progress has been made is in the study of transducers to be used as transfer standards in the GPa range. Repeatability and hysteresis have been measured in a bilateral (NIST-IMGC) effort and reported.

Turning to the topic of piston gauges operating in gas, Mr Molinar points out that a number of parameters are found to be important in achieving good reproducibility. He illustrates this point by showing studies of changes in effective area as a function of the piston height, frequency of piston revolution, gas species, and mode of operation (absolute or gauge). These effects suggest that more elaborate models are required in order to compute the effective area of piston-cylinder combinations. Until such problems are addressed, uncertainties smaller than  $10^{-5}$  will be questionable, he says.

The Working Group met at the BIPM earlier in the week, on 29 May 1991, and one of the topics discussed was whether or not to agree to play a role in laboratory accreditation of pressure calibrations. There was a general consensus, Mr Molinar reports, that this is not an appropriate task for a CCM Working Group. (Many CCM delegates spontaneously voice their support for this conclusion.)

To sum up the state of affairs in high pressure metrology, Mr Molinar presents a graph (figure 5 of document CCM/91-4) showing decreasing calibration accuracy with increasing pressure from about 1 MPa to 10 GPa. He also mentions the technology appropriate to the region of highest pressure metrology. Such high pressures have some scientific interest, for example to geology, and Mr Molinar thinks the Working Group members may consider future work in this pressure region.

#### *Decisions on future work*

Mr Molinar concludes with a list of the decisions made by the Working Group at its recent meeting :

— to produce a second edition of the Directory of high-pressure metrology capabilities ;

- to continue the international comparisons at 700 MPa;
- to exchange information on measurements of geometrical effective areas and pressure distortion coefficients;
- to cooperate in developing better methods of calculating pressure distortion coefficients for piston-cylinder combinations;
- to organize a seminar, in 1993 or 1994, on topics of interest to the Working Group.

Mr Peters comments that dimensional measurements needed in the calculation of piston area approach the limits of present capabilities. Mr Molinar replies that the LNE and the PTB have a bilateral project to study this problem.

The President commends Mr Molinar on his presentation and now asks Mr Stuart to give the report of the Working Group which he chairs.

### 3.5. Medium pressures

#### *International comparisons in the range 10 kPa to 140 kPa*

The written report of the Working Group can be found in document CCM/91-18. The major activity continues to be international comparisons in the region of 10 kPa to 140 kPa. Mr Stuart recalls that the transfer standard is a special pressure balance (also referred to as a piston gauge) which can operate in either the absolute or gauge mode; that is, can generate absolute pressures or pressures relative to the ambient atmosphere. The international comparisons have proceeded in a «petal» configuration. In one twelve-month period, three different laboratories make measurements with the transfer standard after which it is returned to the pilot laboratory (NPL). The reason for this scheme is largely dictated by the one-year validity of the «ATA carnet», a document used to facilitate customs formalities. The participants in the comparison all use the transfer standard to generate a pressure that is then determined by their primary calibration device. In most but not all cases, this device is some type of mercury manometer. All participants are asked to correct their results to standard gravitational acceleration and standard temperature (20 °C).

Mr Stuart now shows graphs (also contained in his written report) of the results obtained to date in both the absolute and gauge modes for measurement of effective area. The graphs show normalized effective area as a function of pressure. The absolute effective area is not given, Mr Stuart explains, so that future participants in the comparison will not be biased by knowledge of the results obtained elsewhere. Error bars for each point include only the type A uncertainties supplied by each laboratory. Several conclusions may be drawn from the measurements

to date: (1) it is clear that the observed differences among laboratories generally exceed the type A uncertainties that have been assigned — often by very significant amounts; (2) as expected, there is no evidence that the effective area of the piston is a function of pressure; (3) more surprising, the effective area has not changed with time.

Two statistics, in Mr Stuart's opinion, point to the usefulness of these comparisons: five new laboratories have asked to participate and half of the participating laboratories have been motivated to rebuild their manometers.

#### *Interest in a comparison from 0,1 MPa to 1 MPa*

At its meeting earlier in the week, on 29 May 1991, Working Group members expressed interest in organizing a comparison in the region from 0,1 MPa to 1 MPa. A pilot laboratory has yet to be found for this project.

Mr Quinn asks whether, in Mr Stuart's opinion, the results of the international comparisons have been pleasing or disappointing to the participants, given that agreement appears to be within about  $10^{-5}$  (excluding the worst cases). Mr Stuart replies that the fact that the type A uncertainty fails to account for the dispersion among laboratories leaves room for further study.

The President now calls on Mr Tilford to present the report of the Working Group on Low Pressures.

### 3.6 Low pressures

Before giving his report, Mr Tilford says a few words about why there have been separate Working Groups on Low Pressures and Very Low Pressures. He points out that the two Working Groups span six decades of pressure between them and draw on a number of different technologies. From a physical standpoint, gas may usefully be considered as a fluid well above about 1 kPa but must be considered as discrete particles well below this transition pressure. These two distinct physical models led to the creation of the two different Working Groups, he explains.

#### *New comparisons in the range 1 Pa to 1 kPa*

Mr Tilford now begins his report (document CCM/91-19). He recalls that, at the last meeting of the CCM in 1988, he presented results of an international comparison from 1 Pa to 1 kPa. The unexpectedly large discrepancies among participants, due in part to shifts in the transfer standards, has led to a reanalysis of the original data and to further studies of the transfer standards.

The transfer standards, capacitance diaphragm gauges, are highly nonlinear due to thermal molecular effects. For this reason it is difficult to compare results not obtained at the same pressure, Mr Tilford says, although an attempt to treat such data has been made. As pilot laboratory, the NIST has continued to monitor the transfer standards and they now appear to be much more stable than when first used. This being the case, there is interest among Working Group members in repeating the comparisons. Mr Tilford reports that the IMGc and the NRLM wish to join the original participants, two of which have remodelled their laboratories in the years since they made their comparison measurements. The participating laboratories use different technologies for their standards and this makes comparison measurements even more interesting. The Working Group, which met earlier in the week, on 28 May 1991, has decided that the new comparisons will begin in 1992. In addition, a short communication describing the initial comparisons will be prepared for publication.

This concludes Mr Tilford's report. He adds, however, that members of the Working Group on Very Low Pressures held an informal discussion during which they agreed that comparisons at  $10^{-7}$  Pa would be a worthwhile project provided agreement could be reached on a suitable transfer standard.

Referring to the serious instabilities seen in the capacitance diaphragm gauges that were used as transfer standards, Mr Wilson wonders if a different type of device might be used. Mr Tilford replies that the pressure region being studied is a difficult one, for reasons alluded to in his introduction. The highest pressures of this region might be measured by quartz spiral gauges while a spinning rotor gauge might be best at the lowest pressures.

Mrs Plassa asks which transfer standards might be used for the proposed comparisons at very low pressures. Mr Tilford replies that the transfer standard would probably be an ionization gauge, either of the Bayard-Alpert or the extractor type.

#### *Merging of the Working Groups on Low and Very Low Pressures*

The President now asks whether the Working Groups on Low and Very Low Pressures should be merged. Mr Kaiser, who was recently appointed chairman of Very Low Pressures, agrees to the consolidation as does Mr Tilford. Mrs Plassa comments that merging of the Working Groups on primary and secondary mass standards has proved to be very successful and suggests the same should be true in the case under discussion. There is, in fact, no voice heard against the proposal.

After some discussion it is decided that the name of the consolidated group will be the Working Group on Low Pressures. The President asks Mr Tilford to chair the consolidated group and, there being no opposition, he agrees.

This concludes the reports of the Working Groups.

Mr Quinn, speaking generally to all the Working Groups, urges them to publish results of international comparisons and other important activities as soon as possible.

#### **4. Density of mercury**

Mr Tilford, having to depart from France on the next day and thus being unable to attend the last session of the CCM, is allowed by the President to present a recommendation for consideration by the CCM. Mr Tilford calls attention to the reliance of precision manometers on an accurate value for the density of mercury. The natural variability in mercury density and the scarcity of laboratories equipped to make relative or absolute measurements of mercury to high precision pose a potential problem, he contends. To improve the present situation, or at the least to forestall its deterioration, he recommends that the CCM adopt a recommendation encouraging the development and maintenance of expertise in the measurement of mercury density.

There is some discussion. It is pointed out that a temperature change of only 5,5 mK will change the density of mercury by  $1 \times 10^{-6}$ . Mr Tilford agrees that temperature control is a serious technical problem in manometry but asserts that relative differences in mercury density can lead to observable discrepancies between manometers. After some discussion of the wording, the delegates agree to the recommendation (see Recommendation G 2 (1991), page G 74).

The President now calls upon Mr Quinn to report on :

#### **5. Developments of prototype balances**

Mr Quinn reminds the delegates that at the last CCM meeting an informal « Balance Club » was established with the aim of exchanging experiences gained in the design and construction of precision balances. The Club held its first meeting earlier in the week, on 29 May 1991, and Mr Quinn now proposes to review the presentations given at that meeting.

##### *BIPM flexure-strip balance*

Mr Quinn begins with a description of the BIPM flexure-strip balance. The crucial design features of this device are elucidated. These include the flexure pivots and their kinematic mounts, two sets of crossed knives

in each pan suspension, damping of the pan suspensions, and tight servo control of the beam to a horizontal position at all times (including when artefacts are exchanged on the pan). Mr Quinn says that the BIPM is constructing a new flexure-strip balance which will, in all probability, replace the NBS-2 balance.

#### *EUROMET project*

Next, Mr Quinn mentions work, reported by Mr Pendrill, concerning a EUROMET project on automatic weighing. The participants from four West European national laboratories have pooled experiences gained in using a variety of balances in a range of load capacities from 50 kg to 100 g. Mr Pendrill has indicated that the conclusions of the EUROMET participants are being prepared for publication.

#### *IMGC hydrostatic balance*

Mr Mosca (IMGC) reported to the Club on an automated hydrostatic balance which can compare masses either in air or in water. The difference in balance dynamics between the two cases, Mr Quinn says, has led Mr Mosca and his colleagues to develop a digital servocontrol system. This is described in a preprint distributed at the Club meeting.

#### *CSMU comparator*

A new kilogram comparator has been built by CSMU. A document describing its major design features was distributed by Mr Spurny at the Club meeting. Mr Quinn shows a drawing taken from this document to illustrate that the new balance is of single-pan design, similar to the NBS-2.

Mr Quinn concludes by noting that participants in the meeting of the Balance Club thought the informal seminar was successful and voted for the continued existence of the Club.

#### *Weighing errors from magnetic components in a balance*

The President thanks Mr Quinn for his presentation and calls upon Mr Davis to summarize document CCM/91-8, of which he is the author. Mr Davis explains that the document examines expected weighing errors due to small, powerful, unshielded magnets placed on the beam of a kilogram comparator. The study was motivated by the fact that this is the design of the BIPM flexure-strip balance. Mr Davis presents the possible sources of weighing error and concludes that all can be made negligible by proper design and careful selection of materials.

## 6. Present status and future work on a possible new definition of the kilogram

### *Proposal for determining the atomic mass unit*

The President calls upon Mr Gläser to present his new proposal for determining the atomic mass unit and, perhaps, redefining the kilogram (document CCM/91-14). The basic idea of the experiment is that atoms of a suitable element ( $^{197}\text{Au}$  seems the best candidate) are ionized and directed to a target, where they are collected and eventually weighed. While gold is accumulating, an electrical current is allowed to flow to the target in order to keep it at constant voltage. The current can be monitored by using a circuit consisting of a current comparator, quantum-Hall resistance standard, and Josephson voltage standard. In carrying through the mathematics, Mr Gläser is able to show that a very simple result is obtained:

$$m = C m_a \int_0^{t_m} f(t) dt$$

where  $m$  is the total mass of gold accumulated on the target during a time  $t_m$ ,  $m_a$  is the atomic mass of gold, and  $f(t)$  is the microwave frequency required to produce the Josephson voltage. The prefactor  $C$  is simply a ratio of known integers.

The mass  $m$ , in principle as much as 100 g, is determined by weighing against a standard. The value of the atomic mass unit  $u$  can then be derived since  $m_a = A_r u$  and  $A_r$ , the atomic mass of gold relative to  $^{12}\text{C}$  is well known. In the event the experiment worked well enough,  $m$  might itself become the mass standard. In the latter case, the kilogram could be defined as a specific number of  $^{197}\text{Au}$  atoms and the mole would then become a derived unit.

Following this presentation, there are many questions about experimental details such as collector efficiency, elimination of impurities, and collection time.

Mr Gläser acknowledges that the experiment is yet to be done but notes that, while there may be unknown technical difficulties, there is no fundamental reason why this method cannot work to  $10^{-8}$  or better. He suggests strategies for overcoming the experimental problems raised by some of the delegates.

### *Other efforts to achieve a new definition of the kilogram*

The President now calls on Mr Quinn to summarize other efforts to achieve a new definition of the kilogram.



Mr Quinn begins by raising the question of whether a new definition is, in fact, necessary. On a superficial level, he says, one might argue that the present definition is adequate. But this position, implying continued reliance on an artefact standard, goes against the currents of metrology. The important question, Mr Quinn continues, is: How good must a new definition be?

He then recalls that at the last Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), in Ottawa (1990), there was a session devoted to the topic of a possible new definition of the kilogram. Mr Quinn presented a paper\* at the session outlining the present state of our knowledge of the kilogram. As explained in this CPEM paper, by making relative measurements among the international prototype, its official copies, and the national prototypes, one can infer limits to the stability of the international prototype of the kilogram. For short periods of time, the relative stability among prototypes is within  $10^{-9}$ . Over the hundred-year history of the prototypes, however, one can see that their masses are diverging.

Although it cannot be proved, Mr Quinn continues, it is reasonable to expect that the absolute variability of the prototypes is within ten times their observed internal consistency. Pursuing this logic leads one to conclude that the stability of the kilogram is within  $5 \times 10^{-9}$  per year.

Mr Quinn adds that Mr Davis has published a note in *Metrologia*\*\* in which he examined precise measurements of various physical constants for evidence of long-term instability in the kilogram. No significant instability was uncovered but Mr Davis was nonetheless able to derive a bound on the stability of the kilogram. Although this bound has some interest in that it is the smallest that is currently available from external evidence, it is unreasonably large and therefore has no bearing on the present discussion, Mr Quinn concludes.

Thus experiments to monitor the stability of the kilogram must have a reproducibility of at least  $10^{-8}$  in order that something useful may be learned in only a couple of years.

Mr Quinn now reviews experimental progress. First, he mentions a project at the PTB to count the number of atoms in an artefact of silicon. One important experimental problem is determining the dimensions of the artefact to sufficient accuracy. A solution may be to fabricate an object whose very shape is a constant of nature.

Next, he refers to experiments in which the weight of a mass standard is balanced against an electromagnetic force. In this type of experiment, being carried out at the NPL and the NIST, measurements

of electrical current and voltage, a velocity, and the local gravitational acceleration are required. In Mr Quinn's opinion, there seems to be no fundamental obstacle to measuring all needed quantities to the necessary accuracy, although significant practical problems remain to be solved. An apparatus built at the NPL is within an order of magnitude of achieving the target uncertainty given above. An improved apparatus has been designed and is under construction.

Mr Quinn concludes by describing a related experiment, first developed in Japan, based on the levitation of a superconducting mass. The uncertainties reached with this apparatus are not yet at the level of the NPL force balance, however.

Mr Gläser points out that, for a complete picture of present efforts, one should not overlook electrostatic experiments. These measure the electrical energy stored in a capacitor in terms of the potential energy of a mass standard in a gravitational field. Mr Gläser also proposes that there should be a report at the next CCM meeting on the progress of experiments with the potential to replace the present definition of the kilogram.

In this regard, Mr Quinn announces that the next CPEM, to be held in Paris in 1992, will have a session devoted to this subject.

The President asks Mr Gläser if he is proposing that a document reviewing the progress toward a new definition of the kilogram be prepared for the next CCM. Mr Gläser replies that, in his opinion, a document is not essential; an oral report and discussion would be sufficient.

## 7. Working Group membership

The President now introduces the topic of Working Group membership. Formal note is taken of the decision to consolidate the Working Group on Low Pressures and the Working Group on Very Low Pressures into one body: the Working Group on Low Pressures. Member laboratories of either former Working Group are automatically members of the consolidated Working Group. In the case where a member laboratory may have named different representatives to the two former Working Groups, it will now have to choose a single representative to the consolidated body. Mr Tilford becomes the chairman of the consolidated Working Group.

The President announces that he has received a letter from the President of the Korea Standards Research Institute (KSRI)\*, Rep. of

\* QUINN T. J., The Kilogram: The Present State of our Knowledge, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1991, **IM-40**, 81-85.

\*\* DAVIS R. S., The Stability of the SI Unit of Mass as Determined from Electrical Measurements, *Metrologia*, 1989, **26**, 75-76

\* When the Korea Standards Research Institute (KSRI) became the Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS) on 17 October 1991, it was specified that all official commitments made in the name of KSRI remain in force.

Korea, applying for CCM membership. Mr Bray explains that membership can only be granted after the meeting of the CGPM later this year. In the meantime, he asks that chairmen of the Working Groups invite the KSRI to participate in any future meetings.

Mrs Plassa announces that the NIM, at its request, will become a member of the Working Group on Mass Standards.

## 8. Miscellaneous

The President reminds the delegates that he will report on this meeting to the CIPM and that his report will be based on the minutes of the rapporteur.

The final wording of Recommendations G 1 (1991) and G 2 (1991) is approved.

The President points out that the CCM usually meets every three years. The third periodic verification of national prototypes of the kilogram will, however, probably be completed by the end of 1992 and the President suggests that the delegates may therefore wish to meet in two years to consider the final results. There is a consensus that the meeting should be scheduled as soon as is practical after the third verification. The spring of 1993 is preferred, although a September date is acceptable to the delegates should this prove necessary. The President explains that the final scheduling of Consultative Committee meetings is determined by the CIPM.

There being no further business, the President thanks the delegates for their participation and adjourns the meeting.

23 September 1991

**Recommendations  
of the Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées  
submitted  
to the Comité International des Poids et Mesures \***

Density of air

RECOMMENDATION G 1 (1991)

The Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées,  
*considering* that

— in 1981 the CIPM adopted the equation for the determination of the density of moist air, proposed by the CCM,

— this equation included a certain number of constants and parameters whose values were specified,

— since 1981 the values of some of these constants and parameters have become better known, in particular an improved value for the gas constant was recommended by CODATA in 1986 and the CIPM adopted the ITS-90,

*recommends* that the text adopted in 1981 be modified to take account of these changes.

---

\* These two Recommendations were approved by the CIPM at its 80th meeting (1991).

RECOMMENDATION G 2 (1991)

The Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées,  
*considering* that

— the uncertainty in the density of mercury is the largest contributing factor to the uncertainty in the most accurate pressure measurements in the neighbourhood of 100 kPa,

— the density of mercury can vary significantly from sample to sample due to naturally occurring variations in isotopic composition,

— the accurate comparisons of the relative densities of individual samples of mercury as well as the determination of the absolute density of a reference sample remains an important task for metrology,

— scientific and industrial requirements for accurate pressure measurement in the above mentioned range continue to increase,

*recommends* that national laboratories maintain their existing capabilities in this field and if possible increase them with the aim of ultimately attaining an uncertainty in our knowledge of the absolute density of mercury samples of a few parts in  $10^7$  at the level of one standard deviation.

---

APPENDIX G 1

---

**Working documents  
submitted to the CCM at its 4th Meeting**

(see the list of documents on page G 28)

---

---

EQUATION FOR THE DETERMINATION  
OF THE DENSITY OF MOIST AIR

(1981/1991)

by R. S. DAVIS \*

*Foreword*

Mass measurements made in air generally require corrections for the effects of buoyancy. In applying these corrections, the BIPM and most national laboratories now use the same equation for the determination of  $\rho$ , the density of moist air [1, 2]. The equation requires input values for the air temperature, pressure, relative humidity (or dew-point temperature), and mole fraction of carbon dioxide. In addition to these variable parameters, the equation includes a number of parameters which are assumed to be constant.

The formalism presented in [1, 2] is often, though unofficially, referred to as the CIPM-81 equation to indicate that its use has been recommended by the Comité International des Poids et Mesures [1] and that 1981 was the year of this recommendation.

In the ten or so years since publication of [1, 2] one of the important constant parameters of the equation, the molar gas constant, has become better known. In addition, updated values for some additional constant parameters have become available. For this reason, the Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM), on the advice of the Working Group on Density, at its last meeting (May 1991) considered that it is worthwhile to amend several of the constant parameters given in [1, 2]. It should be emphasized that both the basic form of the 1981 equation as well as the principles by which it was derived remain unchanged.

The CCM has therefore recommended that the 1981 equation incorporating the amended parameters given below be designated as the « 1981/1991 equation for the determination of the density of moist air », abbreviated in this note to the « 1981/91 equation »\*\*. The 1981/91 equation is valid over the same ranges of pressure, temperature, relative humidity (or dew-point temperature), and carbon dioxide fraction as given in [1, 2].

---

\* President of the Working Group on Density of the Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM).

\*\* This equation was approved by the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) at its 80th meeting (September 1991).



Differences in numerical results obtained from the 1981 and the 1981/91 equations are small. It may be concluded in fact that: (1) air densities calculated using the 1981/91 equation do not differ significantly from those calculated from the 1981 equation; and (2) the overall uncertainty of the 1981/91 equation is not significantly improved over that of the 1981 equation. The reason for making the changes is simply to ensure that the values used for all constant parameters used in the equation are the best currently available.

## 1. The 1981 Equation

In essence, the 1981 equation for the density of moist air has the following form:

$$\rho = \frac{pM_a}{ZRT} \left[ 1 - x_v \left( 1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad (1)$$

where  $p$  is the pressure,  $T$  the thermodynamic temperature,  $x_v$  the mole fraction of water vapour,  $M_a$  the molar mass of dry air,  $M_v$  the molar mass of water,  $R$  the molar gas constant, and  $Z$  the compressibility factor.

It is assumed that  $M_a$  is constant except for local variability of the mole fraction of carbon dioxide. The latter is further assumed to be exactly opposite to variability of the mole fraction of oxygen, leading to an auxiliary equation for  $M_a$ :

$$M_a = [28,963\ 5 + 12,011(x_{\text{CO}_2} - 0,000\ 4)] \times 10^{-3} \text{ kg/mol} \quad (2)$$

where  $x_{\text{CO}_2}$  is the mole fraction of carbon dioxide.

The mole fraction of water vapour  $x_v$  is not measured directly. Instead, it is derived either from a measurement of the relative humidity  $h$  or from a measurement of the dew-point temperature  $t_r$ . In either case, one has need of  $p_{\text{sv}}(t)$ , the saturation vapour pressure of moist air. In [1, 2], this is calculated from the auxiliary equation:

$$p_{\text{sv}} = 1 \text{ Pa} \times \exp\left( AT^2 + BT + C + \frac{D}{T} \right). \quad (3)$$

Also needed is the enhancement factor  $f$  calculated from:

$$f = \alpha + \beta p + \gamma t^2, \quad (4)$$

where  $t$  is the temperature in degrees Celsius.

Recall that

$$x_v = hf(p, t) \frac{p_{\text{sv}}(t)}{p} = f(p, t_r) \frac{p_{\text{sv}}(t_r)}{p}.$$

Finally, the compressibility  $Z$  is calculated from the following equation:

$$Z = 1 - \frac{p}{T} [a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + (b_0 + b_1 t)x_v + (c_0 + c_1 t)x_v^2] + \frac{p^2}{T^2} (d + ex_v^2). \quad (5)$$

The constant parameters in (3-5) are specified in [1, 2].

## 2. The Changes

### 2.1. Molar gas constant

Equation (1) contains  $R$ , the molar gas constant. Since the publication of [1, 2], the CODATA has recommended an improved estimate of  $R$  [3]:

$$R = 8,314\ 510 (1 \pm 8,4 \times 10^{-6}) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}.$$

This value exceeds that used in [1, 2] by 12 parts in  $10^6$ . The uncertainty of the newer estimate is 0,27 times that assigned to the value of  $R$  used in [1, 2]. While this is a significant improvement, the overall uncertainty in calculated air density is essentially unchanged.

### 2.2. Temperature

One may also note that temperature, a variable parameter, appears explicitly in the denominator of (1) and implicitly in the calculation of  $p_{\text{sv}}$ ,  $f$ , and  $Z$  (3-5). On 1 January 1990, the ITS-90 [4] superseded the IPTS-68 and it is worthwhile mentioning how this change affects the equation for the density of moist air. Equation (1) is derived by assuming that moist air is an ideal gas and then making the relatively small corrections necessary to take account of non-ideality. Thus the temperature  $T$  is meant to be the thermodynamic temperature. Temperatures given on the ITS-90 should therefore be used because temperatures on the ITS-90 are closer to the corresponding thermodynamic temperatures than were those on IPTS-68.

Since (3-5) are used for relatively minor corrections, the small change introduced by the adoption of the ITS-90 (about 5 mK at 20 °C) is of secondary importance. We have, nonetheless, used the ITS-90 in recomputing the constant parameters for these equations as discussed more fully in the next section.

### 2.3. $f$ , $p_{sv}$ , $Z$

As documented in [1, 2], the formulas for the calculation of  $p_{sv}$ ,  $f$ , and  $Z$  are based on the work of Greenspan, Wexler, and Hyland. Hyland and Wexler have recalculated this work [5] and we have incorporated their new results. It may be noted that these results depend on  $R$  and on  $T$ . These authors, anticipating a modification to the IPTS-68, showed how their results could be converted to a different temperature scale. The value of  $R$  used in [5] is sufficiently close to the value now recommended by CODATA [3] that their results are insensitive to this change.

### 3. New constant values

The amended constant parameters which are appropriate to the 1981/91 equation for the determination of the density of moist air are given in Table 1. The original parameters of the 1981 equation are also given for comparison purposes. One may note that, in the case of the enhancement factor  $f$ , the parameters are unchanged by the new calculations.

In [1, 2], the leading constant of the final equation for the determination of the density of moist air is  $M_a/R$ . The calculation of  $M_a$  remains unchanged from 1981 but the value of  $R$  is now amended as noted above in Section 2.1.

### 4. Effect of the changes

It is stated in the Foreword that the differences between the 1981 and the 1981/91 equations for the determination of the density of moist air are small. Table 2 illustrates this by comparing the results obtained using each set of constant parameters given in Table 1. The mole fraction of carbon dioxide is assumed equal to 0,000 4 for these calculations and the ITS-90 is used in all cases. The choice of relative humidity rather than dew-point temperature as the input parameter for these illustrative examples was arbitrary.

For all examples given in Table 2, air densities calculated from the 1991 constant parameters are smaller by about 3 parts in  $10^5$  relative to calculations using the 1981 parameters. While these differences are within the uncertainties ascribed to the equation, they are significant with respect to the precision of tabulated values given in references [1, 2]. It may be noted that the change in computed air density due to the introduction of the latest CODATA value for  $R$  is roughly equal to the change due to the new  $Z$  values.

TABLE 1

Constant parameters specified for the 1981 equation for the determination of the density of moist air and their amended 1991 values as recommended in this report for the 1981/91 equation.

	1981	1991
Vapour pressure at saturation, $p_{sv}$		
$A/(10^{-5} \text{ K}^{-2})$	1,281 180 5	1,237 884 7
$B/(10^{-2} \text{ K}^{-1})$	- 1,950 987 4	- 1,912 131 6
$C$	34,049 260 34	33,937 110 47
$D/(10^3 \text{ K})$	- 6,353 631 1	- 6,343 164 5
enhancement factor, $f$		
$\alpha$	1,000 62	1,000 62
$\beta/(10^{-8} \text{ Pa}^{-1})$	3,14	3,14
$\gamma/(10^{-7} \text{ K}^{-2})$	5,6	5,6
compressibility factor, $Z$		
$a_0/(10^{-6} \text{ K Pa}^{-1})$	1,624 19	1,581 23
$a_1/(10^{-8} \text{ Pa}^{-1})$	- 2,896 9	- 2,933 1
$a_2/(10^{-10} \text{ K}^{-1} \text{ Pa}^{-1})$	1,088 0	1,104 3
$b_0/(10^{-6} \text{ K Pa}^{-1})$	5,757	5,707
$b_1/(10^{-8} \text{ Pa}^{-1})$	- 2,589	- 2,051
$c_0/(10^{-4} \text{ K Pa}^{-1})$	1,929 7	1,989 8
$c_1/(10^{-6} \text{ Pa}^{-1})$	- 2,285	- 2,376
$d/(10^{-11} \text{ K}^2 \text{ Pa}^{-2})$	1,73	1,83
$e/(10^{-8} \text{ K}^2 \text{ Pa}^{-2})$	- 1,034	- 0,765
gas constant, $R$		
$R/(\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1})$	8,314 41	8,314 510
leading constant, $M_a(x_{\text{CO}_2} = 0,000 4)/R$ , in equation for the density of moist air		
$M_a R^{-1}/(10^{-3} \text{ kg KJ}^{-1})$	3,483 53	3,483 49

TABLE 2

Examples comparing results obtained using the 1981 equation for the determination of the density of moist air and the 1981/91 equation. The air density  $\rho$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ), the vapour pressure at saturation  $p_{sv}$  (Pa), and the compressibility factor  $Z$  are computed as a function of pressure  $p$ , temperature  $t$ , and relative humidity  $h$ . The ITS-90 is used in all calculations. The mole fraction of carbon dioxide is taken to be 0,000 4 in these examples.

	1981	1981/91
$p = 100\ 000$ Pa		
$t = 20$ °C		
$h = 0,50$		
$\rho$	1,183 507	1,183 472
$p_{sv}$	2 338,6	2 339,2
$Z$	0,999 603	0,999 619
$p = 110\ 000$ Pa		
$t = 20$ °C		
$h = 0,10$		
$\rho$	1,306 622	1,306 582
$p_{sv}$	2 338,6	2 339,2
$Z$	0,999 590	0,999 608
$p = 100\ 000$ Pa		
$t = 15$ °C		
$h = 0,90$		
$\rho$	1,202 443	1,202 408
$p_{sv}$	1 705,3	1 705,7
$Z$	0,999 539	0,999 555
$p = 60\ 000$ Pa		
$t = 25$ °C		
$h = 0,50$		
$\rho$	0,694 179	0,694 162
$p_{sv}$	3 168,8	3 169,8
$Z$	0,999 759	0,999 769

## 5. Proposals

Based on the considerations given above, the CCM submitted the following proposals to the CIPM, which approved them at its 80th Meeting (September 1991):

1. In computing the density of moist air, the functional form of all equations given in [1, 2] should be used without change.
2. Some constant parameters given in [1, 2] should be amended as shown in Table 1 of this article.

3. The equation for moist air having the functional form given in [1, 2], but with the amended constant parameters shown in Table 1 of this article, should be referred to as the 1981/1991 equation for the determination of the density of moist air.
4. The ITS-90 should be used with the 1981/91 equation.
5. The overall uncertainty for air density as calculated using the 1981/91 equation is essentially the same as if the 1981 equation were used.

*Acknowledgement.* Thanks are due to Mr P. Carré, now retired from the BIPM, for carrying out computations and analyses necessary to derive the 1981/1991 equation for the determination of the density of moist air.

## References

- [1] Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981), *BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1981, **49**, C1-C15.
- [2] GIACOMO P., Equation for the determination of the density of moist air (1981), *Metrologia*, 1982, **18**, 33-40.
- [3] COHEN E. R., TAYLOR B. N., The 1986 adjustment of the fundamental physical constants, *CODATA Bulletin*, November 1986, No. 63 (Pergamon, Oxford/New York).
- [4] PRESTON-THOMAS H., The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), *Metrologia*, 1990, **27**, 3-10.
- [5] HYLAND R. W., WEXLER A., Formulations for the thermodynamic properties of the saturated phases of  $\text{H}_2\text{O}$  from 173.15 K to 473.15 K, *ASHRAE Trans.*, 1983, **89**, Part IIA, 500-519.  
HYLAND R. W., WEXLER A., Formulations for the thermodynamic properties of dry air from 173.15 K to 372.15 K, at pressures to 5 MPa, *ASHRAE Trans.*, 1983, **89**, Part IIA, 520-535.

---

TABLE DES MATIÈRES  
TABLE OF CONTENTS

---

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA MASSE  
ET LES GRANDEURS APPARENTÉES

4<sup>e</sup> session (1991)

---

	Pages
Liste des sigles .....	v
Le BIPM et la Convention du Mètre .....	vii
Liste des membres .....	ix
Ordre du jour .....	xii
<b>Rapport au Comité international des poids et mesures, par R. S. Davis .....</b>	<b>G 1</b>
1. Ouverture de la session .....	2
2. Troisième vérification périodique des prototypes nationaux .....	2
Effets du nettoyage-lavage sur le prototype international, les six témoins et d'autres prototypes .....	3
Évolution de la masse de prototypes après nettoyage-lavage (prototype international, n <sup>os</sup> 7, 67, 73) .....	4
Évolution de la masse des témoins du prototype international et du prototype n <sup>o</sup> 25 depuis 1889 .....	4
Mise en pratique de la définition du kilogramme (processus de nettoyage-lavage à appliquer aux prototypes nationaux) .....	4
Vérification des prototypes nationaux (comparaison des vingt premiers prototypes dans l'état de leur arrivée au BIPM; comparaison aux deux témoins n <sup>os</sup> 8 (41) et 32 après deux nettoyages-lavages; évolution de leur masse dans le temps) .....	5
Discussion .....	6
3. Rapports des groupes de travail .....	7
3.1. Étalons de masse .....	7
Effets du nettoyage .....	7
Effets de l'humidité .....	8
Corrosion et autres effets de surface .....	8
Questions diverses .....	9
Comparaisons internationales d'étalons secondaires .....	9

3.2. Masse volumique	10
Établissement d'une table de la masse volumique de l'eau	10
Masse volumique de l'air	11
Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981/1991)	12
3.3. Force	13
Mesures de force au-dessus de 1 MN	13
Stabilité à long terme	14
Discussion	14
3.4. Hautes pressions	15
Comparaisons dans le domaine de 20 MPa à 100 MPa	15
Comparaisons jusqu'à 1 GPa	15
Décisions pour les travaux futurs	16
3.5. Moyennes pressions	17
Comparaisons internationales dans le domaine de 10 kPa à 140 kPa	17
Intérêt pour une comparaison dans le domaine de 0,1 MPa à 1 MPa	18
3.6. Basses pressions	18
Nouvelles comparaisons entre 1 Pa et 1 kPa	18
Fusion des groupes de travail sur les basses et les très basses pressions	19
4. Masse volumique du mercure	20
5. Études sur les balances prototypes	20
Balance à suspensions flexibles du BIPM	21
Programme d'EUROMET	21
Balance hydrostatique de l'IMGC	21
Comparateur du CSMU	21
Erreurs causées par des aimants dans une balance	22
6. Situation actuelle et travaux futurs pour une éventuelle redéfinition du kilogramme	22
Détermination de l'unité de masse atomique (comptage du nombre d'atomes d'un objet en silicium; comparaison du poids d'un étalon à une force électromagnétique; lévitation d'une masse supraconductrice; expérience électrostatique)	22
Autres expériences visant à mettre au point une nouvelle définition du kilogramme	23
7. Composition des groupes de travail du CCM (fusion de deux groupes de travail; M. Tilford est nommé président du Groupe de travail basses pressions)	24
8. Questions diverses (rapport au CIPM; adoption des recommandations; prochaine session)	25
Recommandations présentées au Comité international des poids et mesures:	
Recommandation G 1 (1991): Masse volumique de l'air	26
Recommandation G 2 (1991): Masse volumique du mercure	27
Annexe	28
G 1. Documents de travail présentés à la 4 <sup>e</sup> session du CCM	28
Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981-1991), par R. S. Davis	31

## English text of the Report

Note on the use of the English text. Note sur l'utilisation du texte anglais	41
The BIPM and the Convention du Mètre	43
List of members	45
Agenda	48
Report to the Comité International des Poids et Mesures, by R. S. Davis	49
1. Opening of the Meeting	50
2. Third periodic verification of national prototypes	50
Effects of cleaning and washing on the international prototype, its six official copies and other prototypes	51
Evolution in mass after cleaning and washing the prototypes	51
Evolution of the mass of the official copies and of prototype N° 25 since 1889	52
Mise en pratique of the definition of the kilogram (cleaning and washing to be applied to national prototypes)	52
Verification of the national prototypes (comparison of the first twenty prototypes in the state in which they are received by the BIPM; comparisons with the official copies N° 8(41) and 32 after two cleanings and washings; evolution in their masses with time)	53
Discussion	54
3. Reports of the Working Groups	55
3.1. Mass standards	55
Cleaning effects	55
Humidity effects	56
Corrosion and other surface effects	56
Diverse topics	56
International comparisons of secondary standards	57
3.2. Density	58
Compilation of a table for water density	58
Air density	59
Equation for the determination of the density of moist air (1981/1991)	59
3.3. Force	60
Higher levels of force	60
Long-term stability	61
Discussion	61
3.4. High pressures	62
Comparisons from 20 MPa to 100 MPa	62
Comparison to 1 GPa	62
Decisions on future work	63
3.5. Medium pressures	64
International comparisons in the range 10 kPa to 140 kPa	64
Interest in a comparison from 0,1 MPa to 1 MPa	65
3.6. Low pressures	65
New comparisons in the range 1 Pa to 1 kPa	65
Merging of the Working Groups on Low and Very Low Pressures	66

4. Density of mercury .....	67
5. Developments of prototype balances .....	67
BIPM flexure-strip balance .....	67
EUROMET project .....	68
IMGC hydrostatic balance .....	68
CSMU comparator .....	68
Weighing errors from magnetic components in a balance .....	68
6. Present status and future work on a possible new definition of the kilogram. ....	69
Proposal for determining the atomic mass unit (counting of the number of atoms in an artefact of silicon ; comparison of the weight of a mass standard to an electrostatic force ; levitation of a superconducting mass ; electrostatic experiments) .....	69
Other efforts to achieve a new definition of the kilogram .....	69
7. Working Group membership (merging of two Working Groups ; Mr Tilford is chairman of the Working Group on Low Pressures) .....	71
8. Miscellaneous (report to the CIPM ; adoption of recommendations ; future meeting of the CCM) .....	72
Recommendations submitted to the Comité International des Poids et Mesures :	
Recommendation G 1 (1991) : Density of air .....	73
Recommendation G 2 (1991) : Density of mercury .....	74
<b>Appendix</b> .....	75
G 1. Working documents submitted to the CCM at its 4th meeting .....	75
<b>Equation for the Determination of the Density of Moist Air (1981/1991), by R. S. Davis</b> .....	77

IMPRIMERIE DURAND

28600 LUISANT (FRANCE)

---

Dépôt légal : Imprimeur, 1992, n° 7979

ISBN 92-822-2125-3

ISSN 1016-3778

ACHEVÉ D'IMPRIMER : AOÛT 1992

Imprimé en France