

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES



COMITÉ INTERNATIONAL  
DES  
POIDS ET MESURES

Procès-verbaux de la 82<sup>e</sup> session  
Report of the 82nd Meeting  
1993

TOME 61

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

ISSN 0370-2596  
ISBN 92-822-2130-X

---

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

---

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

AECL	AECL Research, Chalk River (Canada)
AIEA/IAEA	Agence internationale de l'énergie atomique/International Atomic Energy Agency
AIG/IAG	Association internationale de géodésie/International Association of Geodesy
AOAC	Association of Official Analytical Chemists, Arlington (É.-U. d'Amérique)
APMP	Asia/Pacific Metrology Programme
ASTM	American Society for Testing and Materials, Philadelphia (É.-U. d'Amérique)
BARC	Bhabha Atomic Research Centre, Trombay (Inde)
*BCM/CBNM	Bureau central de mesures nucléaires/Central Bureau for Nuclear Measurements, IMMR-CCE, Geel (Belgique), <i>voir</i> IMMR/IRMM
BCR	Bureau communautaire de référence de la Communauté économique européenne/Community Bureau of Reference of the Commission of the European Communities
BESSY	Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung mbH
BEV	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Vienne (Autriche)
BIPM	Bureau international des poids et mesures
BNM	Bureau national de métrologie, Paris (France)
*CBNM	<i>voir</i> BCMN
CCDM	Comité consultatif pour la définition du mètre
CCDS	Comité consultatif pour la définition de la seconde
CCE	Comité consultatif d'électricité
CEMRI	Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants

---

\* Les laboratoires ou organisations marqués d'un astérisque soit n'existent plus soit figurent sous un autre sigle.

\* Organizations marked with an asterisk either no longer exist or operate under a different acronym.

CCM	Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées
*CCP	Comité consultatif de photométrie, <i>voir</i> CCPR
CCPR	Comité consultatif de photométrie et radiométrie
CCQM	Comité consultatif pour la quantité de matière
CCT	Comité consultatif de thermométrie
CCU	Comité consultatif des unités
CEI/IEC	Commission électrotechnique internationale/International Electrotechnical Commission
CEM	Centro Español de Metrología, Madrid (Espagne)
CGPM	Conférence générale des poids et mesures
CIE	Commission internationale de l'éclairage/International Commission on Illumination
CIPM	Comité international des poids et mesures
CITAC	Cooperation on International Traceability in Analytical Chemistry
CMI	Czech Institute of Metrology, Brno (Rép. tchèque)
CNAM	Conservatoire national des arts et métiers, Paris (France)
CNEA	Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires (Rép. argentine)
CNES	Centre national d'études spatiales, Toulouse (France)
CNRS	Centre national de la recherche scientifique, Paris (France)
CODATA	Committee on Data for Science and Technology
COLOQ 3	Troisième colloque sur les lasers et l'optique quantique
CORM	Council for Optical Radiation Measurements (É.-U. d'Amérique)
CPEM	Conference on Precision Electromagnetic Measurements
CRL	Communications Research Laboratory, Tokyo (Japon)
CSIR	(ex NPRL) Council for Scientific and Industrial Research, Division of Production Technology, Pretoria (Afrique du Sud)
CSIRO	(ex NML) Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Division of Applied Physics, Lindfield (Australie)
DFM	Danish Institute for Fundamental Metrology, Lyngby (Danemark)
*DSIR	Department of Scientific and Industrial Research, Lower Hutt (Nouvelle-Zélande), <i>voir</i> MSL
DSS	Department of Science Service, Bangkok (Thaïlande)
EFTF	Forum européen fréquence et temps/European Frequency and Time Forum
EGAS	European Group for Atomic Spectroscopy
EHESS	École des hautes études en sciences sociales, Paris (France)
ELICOLS	Eleventh International Conference on Laser Spectroscopy

ENS	École normale supérieure, Paris (France)
EOLAS	Irish Science and Technology Agency, Dublin (Irlande)
EQEC	European Quantum Electronics Conference
ETCA	Établissement technique central de l'armement, Arcueil (France)
ETL	Electrotechnical Laboratory, Tsukuba (Japon)
EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
GGTTS	CCDS Group on GPS Time Transfer Standards
GRGS	Groupe de recherches de géodésie spatiale
IAE	Institute of Atomic Energy, Beijing (Rép. pop. de Chine)
IAEA	<i>voir AIEA</i>
IAG	<i>voir AIG</i>
IAU	<i>voir UAI</i>
ICAP	International Conference on Atomic Physics
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
IDCNS	Interdivisional Committee on Nomenclature and Standards of IUPAC
IEA	Instytut Energii Atomowej, Swierk (Pologne)
IEC	<i>voir CEI</i>
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEN	Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, Turin (Italie)
*IER-EPFL	<i>voir IRA</i>
IFIN	Institutul de Fizica si Inginerie Nucleara, Bucarest (Roumanie)
IGN	Institut géographique national, Paris et Saint-Mandé (France)
IGS	International Geodynamics Service
IIR	(ex UVVVR) Inspectorate for Ionizing Radiation, Prague (Rép. tchèque)
ILAC	International Laboratory Accreditation Conference
IMGC	Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Turin (Italie)
IMMR/IRMM	(ex BCMN) Institut des matériaux et mesures de référence/ Institute for Reference Materials and Measurements, Geel (Belgique)
INM	Institut national de métrologie, Paris (France)
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, Rio de Janeiro (Brésil)
INTERMAG	International Magnetism Conference
ION	Institute of Navigation, Alexandria, VA (É.-U. d'Amérique)
IPQ	Instituto Português da Qualidade, Lisbonne (Portugal)
IRA	(ex IER-EPFL) Institut de radiophysique appliquée, Lausanne (Suisse)
IRL	Industrial Research Limited, Lower Hutt (Nouvelle-Zélande)

IRMM	<i>voir</i> IMMR.
ISO	Organisation internationale de normalisation/International Organization for Standardization
ISO/TAG4	Organisation internationale de normalisation, Comité technique 4 (métrologie)/International Organization for Standardization, Technical Advisory Group 4 (Metrology)
IUGG	<i>voir</i> UGGI
IUPAC	<i>voir</i> UICPA
IUPAP	<i>voir</i> UIPPA
JET	Joint European Torus
JILA	Joint Institute for Laboratory Astrophysics, Boulder (É.-U. d'Amérique)
KRISS	(ex KSRI) Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon (Rép. de Corée)
*KSRI	Korea Standards Research Institute, Taejon (Rép. de Corée), <i>voir</i> KRISS
LCIE	Laboratoire central des industries électriques, Fontenay-aux-Roses (France)
LEP	Laboratoires d'électronique Philips, Limeil-Brévannes (France)
LGAI	Laboratori General d'Assaigs i Investigacions, Bellaterra (Espagne)
LHA	Laboratoire de l'horloge atomique, Orsay (France)
*LMRI	Laboratoire de métrologie des rayonnements ionisants, Saclay (France), <i>voir</i> LPRI
LNE	Laboratoire national d'essais, Orsay et Paris (France)
LNETH	Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, Lisbonne (Portugal)
LNMRI	Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, Rio de Janeiro (Brésil)
LPRI	(ex LMRI) Laboratoire primaire des rayonnements ionisants, Saclay (France)
LPTF	Laboratoire primaire du temps et des fréquences, Paris (France)
MRI	Metrology Research Institute, Helsinki (Finlande)
MSL	(ex DSIR) Measurement Standards Laboratory of New Zealand, Industrial Research Limited, Lower Hutt (Nouvelle-Zélande)
NAC	National Accelerator Centre, Faure (Afrique du Sud)
NAMAS	National Measurement Accreditation Service, NPL, Teddington (Royaume-Uni)
*NBS	National Bureau of Standards, Gaithersburg (É.-U. d'Amérique), <i>voir</i> NIST
NEWRAD	Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry

NIM	Institut national de métrologie/National Institute of Metrology, Beijing (Rép. pop. de Chine)
NIRH	National Institute of Radiation Hygiene, Brønshøj (Danemark)
*NIRP	National Institute of Radiation Protection, Stockholm (Suède), voir SRPI
NIST	(ex NBS) National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg (É.-U. d'Amérique)
NMi	(ex VSL) Nederlands Meetinstituut, Delft (Pays-Bas)
*NML	National Measurement Laboratory, Lindfield (Australie), voir CSIRO
NORAMET	North and Central American Metrology Cooperation
NPL	National Physical Laboratory, Teddington (Royaume-Uni)
NPLI	National Physical Laboratory of India, New Delhi (Inde)
*NPRL	National Physical Research Laboratory, Pretoria (Afrique du Sud), voir CSIR
NRC	Conseil national de recherches du Canada/National Research Council, Ottawa (Canada)
NRLM	National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba (Japon)
OFMET	Office fédéral de métrologie/Eidgenössisches Amt für Messwesen, Wabern (Suisse)
OMH	Országos Mérésügyi Hivatal, Budapest (Hongrie)
ONERA	Office national d'études et de recherches aérospatiales, Châtillon (France)
OP	Observatoire de Paris (France)
PKNM	Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Varsovie (Pologne)
PSPKR	Pusat Standardisasi dan Penelitian Keselamatan Radiasi, Jakarta (Indonésie)
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig (Allemagne)
PTTI	Precise Time and Time Interval Applications and Planning Meeting
SCL	Standards and Calibration Laboratory (Hong Kong)
SCPRI	Service central de protection contre les rayonnements ionisants, Le Vésinet (France)
SP	Statens Provningsanstalt, Borås (Suède)
SRPI	(ex NIRP/SSI) Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm (Suède)
SSDL	Secondary Standards Dosimetry Laboratories
STUK	Säteilyturvakeskus, Helsinki (Finlande)
UAI/IAU	Union astronomique internationale/International Astronomical Union

UDZ	Ústav Dozimetrie Zárení, Prague (Rép. tchèque)
UGGI/UUGG	Union géodésique et géophysique internationale/International Union of Geodesy and Geophysics
UICPA/IUPAC	Union internationale de chimie pure et appliquée/International Union of Pure and Applied Chemistry
UIPPA/IUPAP	Union internationale de physique pure et appliquée/International Union of Pure and Applied Physics
URSI	Union radioscientifique internationale/International Union of Radio Science
*UVVVR	<i>voir</i> IIR
VNIIM	Institut de métrologie D.I. Mendéléev/D.I. Mendeleev Institute for Metrology, Saint-Pétersbourg (Féd. de Russie)
* VSL	Van Swinden Laboratorium, Delft (Pays-Bas), <i>voir</i> NMI
WECC	Western European Calibration Cooperation

## 2. Sigles des termes scientifiques Acronyms for scientific terms

EAL	Échelle atomique libre/Free atomic time scale
EHQ/QHE	Effet Hall quantique/Quantum Hall Effect
EIT-90/ITS-90	Échelle internationale de température de 1990/International Temperature Scale of 1990
GC	Chromatographie en phase gazeuse/Gas Chromatography
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HAMAS	Spectrométrie de masse de haute exactitude/High Accuracy Mass Spectrometry
IDMS	Spectrométrie de masse avec dilution isotopique/Isotope Dilution Mass Spectrometry
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITS-90	<i>voir</i> EIT-90
LASSO	Laser Synchronization from Satellite Orbit
NDIR	[Spectrométrie] infrarouge non-dispersive/Non-dispersive Infrared [Spectrometry]
PRT	Thermomètre à résistance de platine/Platinum resistance thermometer
QHE	<i>voir</i> EHQ
QHR	<i>voir</i> RHQ
RHQ/QHR	Résistance de Hall quantifiée/Quantum Hall resistance
SA	Accès sélectif/Selective availability
SI	Système international d'unités/International System of Units
SIR	Système international de référence pour les mesures d'activité d'émetteurs de rayons gamma/International Reference System for gamma-ray emitting radionuclides
SMOW	Standard Mean Ocean Water



SPRT	Thermomètre à résistance de platine étalon/Standard platinum resistance thermometer
STEP	Satellite Test of the Equivalence Principle
TA	Temps atomique/Atomic Time
TAI	Temps atomique international/International Atomic Time
TT	Temps terrestre/Terrestrial Time
UTC	Temps universel coordonné/Coordinated Universal Time
VLBI	Radio-interférométrie à très longue base/Very Long Baseline Interferometry

---



---

## 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\*.

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), aux échelles de temps (1988) et à la quantité de matière (1993). 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.

---

\* Au 31 décembre 1993, quarante-sept États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne, Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép. d'), 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, Russie (Féd. de), Slovaque (Rép.), Suède, Suisse, Tchèque (Rép.), Thaïlande, Turquie, Uruguay, Venezuela.

Une quarantaine de physiciens ou de 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*, 1963, 31, 97). Chaque comité consultatif, 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 neuf :

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.
9. Le Comité consultatif pour la quantité de matière (CCQM), créé en 1993.

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.

---

LISTE DES MEMBRES  
DU  
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES  
au 21 septembre 1993

*Président*

1. D. KIND, président de la Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 3300 Braunschweig, Allemagne.

*Secrétaire*

2. J. KOVALEVSKY, astronome à l'Observatoire de la Côte d'Azur, avenue N. Copernic, 06130 Grasse, France.

*Membres*

3. W.R. BLEVIN, directeur de la Division of Applied Physics, CSIRO, P.O. Box 218, Bradfield Road, Lindfield NSW 2070, Australie. *Vice-président.*
4. J. DE BOER, Institut de physique, Université d'Amsterdam, Valckenierstraat 65, Amsterdam-C, Pays-Bas.
5. P.B. CLAPHAM, directeur du National Physical Laboratory, Teddington TW11 0LW, Royaume-Uni.
6. L. CROVINI, directeur de l'Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Strada delle Cacce 73, 10135 Turin, Italie.
7. GAO Jie, directeur par interim, Joint Laboratory of High Technology Metrology and Measurement, State Bureau of Technical Supervision, BP 2112, Beijing 100088, Rép. pop. de Chine.
8. E.S.R. Gopal, directeur du National Physical Laboratory of India, Dr K.S. Krishnan Road, New Delhi 110012, Inde.
9. K. IZUKA, c/o National Research Laboratory of Metrology, 1-1-4 Umezono, Tsukuba 305, Japon.
10. O.V. LOUNASMAA, Low Temperature Laboratory, Helsinki University of Technology, SF-02150 Espoo, Finlande.

11. J.W. LYONS, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, É.-U. d'Amérique.
12. P. PÂQUET, directeur de l'Observatoire royal de Belgique, 3 avenue Circulaire, B-1180 Bruxelles, Belgique.
13. T. PLEBAŃSKI, président du Committee on Metrology and Scientific Instrumentation, Polish Academy of Sciences, Palac Kultury i Nauki, Office No. 2321, P.O. Box 24, 00901 Varsovie, Pologne.
14. V.I. POUSTOVOIT, vice-président, GOSSTANDART, Leninski prosp. 9b, 117049 Moscou, Féd. de Russie.
15. K. SIEGBAHN, Institut de physique de l'Université d'Uppsala, Box 530, 75121 Uppsala 1, Suède.
16. J. SKÁKALA, professeur à l'Université technique slovaque, Nám. Slobody 17, 812 31 Bratislava, Rép. slovaque. *Vice-président.*
17. R. STEINBERG, chef du Département de physique et métrologie, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 1101 Buenos Aires, Argentine.
18. J. VANIER, ancien directeur général de l'Institut des étalons nationaux de mesure, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa K1A 0S1, Canada.

*Membres honoraires*

1. E. AMBLER, The Belvedere (No. 626), 1600 N. Oak Street, Arlington, VA 22209.
  2. L.M. BRANSCOMB, Box 309, Concord, Massachusetts 01742.
  3. J.V. DUNWORTH, The Warbuck, Kirk Michael, Isle of Man.
  4. M. KERSTEN, Am Hohen Tore 4A, 3300 Braunschweig.
  5. F.J. LEHANY, 5 Gladstone Avenue, Hunters Hill, NSW 2110.
  6. H. PRESTON-THOMAS, 1109 Blasdell Avenue, Ottawa K1K 0C1.
-

---

LISTE DU PERSONNEL  
DU  
BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES  
au 1<sup>er</sup> janvier 1994

---

Directeur : M. T. J. Quinn

*Longueurs* : M. J.-M. Chartier

M. R. Felder, Mme S. Picard, MM. L. Robertsson, L. Vitouchkine<sup>(1)</sup>, A. Zarka  
Mme A. Chartier, M. J. Labot

*Masse et grandeurs apparentées* : M. R.S. Davis, M. A. Sakuma

M. A. Picard  
Mme J. Coarasa, M. J. Hostache  
M. J. Dias

*Échelles de temps* : Mme C. Thomas

MM. J. Azoubib, W. Lewandowski, G. Petit  
Mlle H. Konaté, M. P. Moussay, Mme M. Thomas

*Électricité* : M. T.J. Witt

MM. F. Delahaye, D. Reymann  
MM. D. Avrons, D. Bournaud  
M. P. Benoit

*Radiométrie et photométrie* : M. R. Köhler

M. R. Goebel  
MM. C. Garreau, F. Lesueur, R. Pello

*Rayonnements ionisants* : M. J.W. Müller

Mme M. Boutillon, MM. P. Bréonce, V.D. Huynh, G. Ratel  
MM. D. Carnet, C. Colas, L. Lafaye, C. Veyradier

*Secrétariat* : Mlle J. Monprofit

Mmes L. Delfour, D. Le Coz, M. Petit

*Metrologia* : M. D.A. Blackburn  
Mme C. Lawrence

*Finances, administration* : Mlle B. Perent  
Mmes M.-J. Martin, D. Saillard

*Gardiens* : M. et Mme Dominguez, M. et Mme Neves

*Femmes de ménage* : Mmes A. Perez, R. Prieto, R. Vara

*Jardiniers* : MM. C. Angot, C. Dias-Nunes

*Atelier de mécanique* : M. J. Sanjaime

MM. B. Bodson, M. de Carvalho, J.-B. Caucheteux, J.-P. Dewa, A. Gama,  
A. Montbrun, F. Perez, D. Rotrou,

MM. E. Dominguez<sup>(2)</sup>, C. Neves<sup>(2)</sup>

*Directeur honoraire* : M. P. Giacomo

*Métrologiste principal honoraire* : M. G. Leclerc

*Métrologiste honoraire* : M. H. Moreau

---

(1) Chercheur associé

(2) Également gardiens





## ORDRE DU JOUR DE LA SESSION

---

1. Ouverture de la session ; quorum ; approbation de l'ordre du jour.
  2. Rapport du secrétaire du Comité (octobre 1992 - septembre 1993).
  3. Comités consultatifs :
    - rapport du CCDS,
    - rapport du CCM,
    - rapport du CCT,
    - réunions futures.
  4. Travaux du BIPM : Rapport du directeur.
  5. Accréditation et certification des laboratoires nationaux de métrologie.
  6. La métrologie en chimie.
  7. Vingtième Conférence générale des poids et mesures, 1995 : discussion préliminaire.
  8. Questions administratives et financières
    - « Rapport aux Gouvernements » pour 1992,
    - quitus pour 1992,
    - exercice 1993 en cours,
    - question des contributions arriérées.
  9. Questions diverses.
-

# COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

---

82<sup>e</sup> session  
(21-23 septembre 1993)

---

## PROCÈS-VERBAUX DES SÉANCES TENUES À SÈVRES

Présidence de M. D. Kind

---

Le Comité international des poids et mesures (CIPM) s'est réuni pour sa 82<sup>e</sup> session le mardi 21, le mercredi 22 et le jeudi 23 septembre 1993. Il a tenu quatre séances.

Étaient présents : MM. BLEVIN, CLAPHAM, CROVINI, GAO, GOPAL, IIZUKA, KIND, KOVALEVSKY, LOUNASMAA, LYONS, PÂQUET, PLEBANSKI, SIEGBAHN, SKÁKALA, STEINBERG, VANIER et QUINN (directeur du BIPM).

Assistaient aussi aux séances : M. GIACOMO (directeur honoraire du BIPM) ; M. TARBÉEV (invité) ; Mlle MONPROFIT et Mme LE COZ (secrétariat).

Excusé : M. DE BOER. Aucune nouvelle de M. POUSTOVOIT n'a été reçue.

### **1. Ouverture de la session ; quorum ; ordre du jour**

Le président ouvre la 82<sup>e</sup> session du Comité international des poids et mesures et accueille les membres présents, en particulier les trois nouveaux membres, MM. Gao, Gopal et Lounasmaa, ainsi que les invités, MM. Giacomo et Tarbéev.

Il remercie le directeur et le personnel du Bureau international des poids et mesures (BIPM) pour la préparation de ce Comité.

Une minute de silence est observée à la mémoire de M. Volet, directeur honoraire du BIPM, décédé le 5 novembre 1992 dans sa quatre-vingt dix-huitième année. Le président rappelle aux membres du CIPM qu'une notice nécrologique concernant M. Volet a été publiée dans les *Procès-verbaux* du CIPM de 1992.

Il note que le nombre de présents à cette session est très élevé et que le quorum est atteint, conformément à l'article 12 de la *Convention du Mètre*. L'ordre du jour est adopté.

Le président invite le secrétaire du Comité à présenter son rapport.

## **2. Rapport du secrétaire du CIPM** (octobre 1992 - septembre 1993)

M. Kovalevsky, secrétaire du CIPM, présente le rapport suivant :

### *États membres de la Convention du Mètre*

Le ministère des Affaires étrangères de France a informé le BIPM, en date du 18 mars 1993, que les nouvelles républiques tchèque et slovaque avaient adhéré à la Convention du Mètre, après la disparition de l'État de Tchécoslovaquie. Les États membres de la Convention du Mètre sont maintenant au nombre de quarante-sept.

Le BIPM a été informé de la décision du gouvernement de Singapour d'adhérer à la Convention du Mètre; les instruments d'adhésion seront prochainement transmis aux autorités françaises. Le BIPM attend d'en être officiellement informé par le ministère français des Affaires étrangères.

Au cours d'un échange de vues sur les adhésions futures à la Convention, il a été convenu que le BIPM devrait encourager les organisations régionales de métrologie et leur apporter tout le soutien possible. Ce serait une manière de démontrer l'utilité des organes de la Convention du Mètre pour favoriser la diffusion du système métrique dans le monde.

### *Membres du Comité international*

Depuis la dernière session du CIPM, deux membres du CIPM ont présenté leur démission, ce sont MM. Wang Daheng et Sala; avec la démission de M. Jensen, cela a porté à trois le nombre de sièges vacants au Comité international. Ces trois sièges vacants ont été pourvus par l'élection de MM. Gao Jie, E.S.R. Gopal et O. Lounasmaa.

### *Réunions des comités consultatifs et des groupes de travail*

— Le Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS) a tenu sa 12<sup>e</sup> session du 24 au 26 mars 1993. Celle-ci a été précédée de la réunion du Groupe de travail sur l'amélioration du TAI les 22 et 23 mars 1993.

— Le Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM) a tenu sa 5<sup>e</sup> session le mercredi 9 et le jeudi 10 juin 1993, précédée par la réunion de ses différents groupes de travail.

— La Section I (Rayons x et  $\gamma$ , électrons) du Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants (CCEMRI) a tenu sa 11<sup>e</sup> réunion du 21 au 23 avril 1993. La Section II (Mesure des radionucléides) a tenu sa 12<sup>e</sup> réunion du 1<sup>er</sup> au 3 juin 1993. La Section III (Mesures neutroniques) a tenu sa 10<sup>e</sup> réunion du 19 au 21 avril 1993.

— Le Comité consultatif de thermométrie (CCT) a tenu sa 18<sup>e</sup> session du 7 au 9 septembre 1993.

### *Situation financière du BIPM et Rapport annuel pour 1992*

Le bureau du Comité a approuvé le projet de *Rapport annuel* pour 1992 préparé par le directeur du BIPM; il a reçu son rapport sur l'exercice 1993 en cours.

Le *Rapport annuel* montre qu'en 1992 le total des dépenses budgétaires est inférieur de 10,9 % au budget voté par le CIPM, l'excédent net des dépenses par rapport aux recettes étant de 397 587 francs-or, soit 1,8 % du budget voté. Ce dépassement des dépenses par rapport aux recettes est inférieur à celui de 1,3 million de francs-or qui avait été prévu lors de la précédente session du CIPM en septembre 1992; cela s'explique en grande partie par l'encaissement, à la fin de 1992, de quelques 1,1 million de francs-or au titre des contributions arriérées.

La répartition (*voir* article 6 (1921) du Règlement annexé à la *Convention du Mètre*) des contributions de sept États membres, ce qui est le cas en 1993, est un fait sans précédent et une source de préoccupation considérable pour l'avenir. On s'est efforcé par des contacts personnels auprès des ambassades de persuader les États en question de verser une partie de leurs contributions restant dues.

### *Indications financières*

Le tableau ci-après donne la situation de l'actif du BIPM, en francs-or, au 1<sup>er</sup> janvier des années portées en tête de colonne.

Comptes	1990	1991	1992	1993
I. — Fonds ordinaires . .	10 924 171,95	11 681 069,08	12 431 411,07	12 113 526,07
II. — Caisse de retraites .	14 002 735,45	14 546 368,84	15 364 041,35	16 395 611,25
III. — Fonds spécial pour l'amélioration du matériel scientifique .	75 835,04	75 627,81	172 765,56	171 995,64
IV. — Caisse de prêts so- ciaux . . . . .	283 545,36	302 431,48	327 514,70	358 173,05
V. — Réserve pour les bâ- timents . . . . .	0,00	0,00	0,00	0,00
VI. — Metrologia . . . . .	0,00	0,00	0,00	0,00
VII. — Fonds de réserve pour l'assurance maladie .	0,00	0,00	0,00	728 727,58
Total . . . . .	25 286 287,80	26 605 497,21	28 295 732,68	29 768 033,59

*Accréditation et certification des laboratoires nationaux de métrologie*

Le bureau a discuté des activités des organismes nationaux chargés de l'accréditation et de la certification des laboratoires nationaux de métrologie. Un document a été préparé et présenté à l'attention du Comité à ce sujet.

*Métrologie en chimie*

Le bureau a discuté du rôle du CIPM et du BIPM dans le domaine de la métrologie en chimie, à la lumière des progrès récents dans ce domaine. Un projet a été préparé par M. Lyons et par le directeur du BIPM pour être présenté au Comité, proposant la création d'un comité consultatif chargé de ces questions.

*Questions diverses*

Le bureau du Comité s'est réuni trois fois depuis la dernière session du CIPM, deux fois au Pavillon de Breteuil et une fois au NPL (Teddington) à l'invitation de M. Clapham.

Le bureau a discuté des sujets suivants :

— La correspondance avec le ministère de la Culture français relative aux conséquences de la décision de placer le Pavillon de Breteuil et l'ensemble du site du BIPM sur la liste des monuments historiques. Le directeur a fait connaître avec fermeté le point de vue du BIPM sur cette question, à la lumière de la Convention du Mètre et de l'Accord de Siège ;

— Les missions et la composition du Groupe de travail du CCDS sur l'application de la relativité générale à la métrologie, qui seront présentés au Comité ;

— Les questions diverses relatives aux promotions et aux carrières du personnel de grade élevé ;

— Un projet de document, préparé par le directeur, destiné à être publié dans *Metrologia*, pour présenter les résultats de comparaisons bilatérales et multi-latérales.

Le président remercie le secrétaire du Comité de son rapport et demande s'il y a des commentaires.

M. Clapham demande à M. Quinn d'expliquer rapidement aux nouveaux membres quel est le rôle et la composition du bureau du Comité. M. Quinn répond que le bureau se compose d'un certain nombre de membres élus par le CIPM (actuellement un président, un secrétaire, et deux vice-présidents) ainsi que du directeur du BIPM. Le bureau se réunit généralement trois fois entre deux sessions du CIPM, et traite d'un grand nombre de questions relatives au BIPM et au CIPM.

### 3. Comités consultatifs

#### 3.1 Comité consultatif pour la définition de la seconde

M. Kovalevsky, président du Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS), présente un bref rapport sur les activités du CCDS, qui a tenu sa 12<sup>e</sup> session au Bureau international des poids et mesures, à Sèvres, les 24, 25 et 26 mars 1993.

La session du CCDS a été précédée par la réunion du Groupe de travail sur l'amélioration du TAI, qui a consacré deux jours à des discussions sur les aspects scientifiques de la formation du TAI, sur les techniques disponibles pour les comparaisons horaires et sur les problèmes rencontrés dans les divers laboratoires.

Le CCDS a étudié les progrès réalisés dans le domaine des étalons atomiques de fréquence et des horloges depuis la précédente session qui s'est tenue en 1989. La stabilité et la comparaison des horloges entre elles ont été examinées. Les étalons primaires de fréquence considérés comme les plus exacts sont toujours les horloges à césium CS1 et CS2 de la PTB. De nouveaux étalons de fréquence à césium sont à l'étude au NIST (NIST-7), au LPTF et au NRLM par exemple, mais ils n'atteignent cependant pas le niveau d'exactitude des étalons de la PTB. Les masers à hydrogène contribuent au TAI pour environ 13 % du poids total. Les fontaines atomiques à césium commencent à donner des résultats prometteurs en France, au Japon, au Royaume-Uni et aux É.-U. d'Amérique.

Le CIPM examine ensuite les recommandations du CCDS.

La Recommandation S 1 (1993), sur l'exactitude des étalons primaires de fréquence, est adoptée\*, sous une forme condensée et légèrement modifiée, comme Recommandation 1 (CI-1993). La mise au point de nouveaux étalons de fréquence continue à préoccuper de nombreux laboratoires, du fait des restrictions budgétaires auxquelles ils sont soumis et qui les empêchent d'aborder de nouveaux domaines de travail.

La Recommandation S 2 (1993), sur la chronométrie des pulsars-milliseconde, s'adresse à la communauté scientifique; elle est très importante pour l'avenir. Elle est adoptée par le CIPM comme Recommandation 2 (CI-1993).

Le CIPM approuve la Recommandation S 3 (1993), sur l'horaire international pour les comparaisons d'horloges à l'aide du système GLONASS en vue simultanée; il considère que cette recommandation s'adresse spécifiquement au BIPM.

La Recommandation S 4 (1993), sur la comparaison d'horloges à l'aide de techniques par laser visant des satellites, est proposée à l'attention des agences spatiales. Elle est adoptée par le CIPM comme Recommandation 3 (CI-1993).

Le CIPM approuve la Recommandation S 5 (1993), sur la nécessité d'améliorer la synchronisation mondiale avec l'UTC, qui a été préparée en grande partie à l'attention du BIPM, et la Recommandation S 6 (1993), sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le Global Positioning System (GPS), dont la portée est essentiellement technique.

Une discussion suit sur les rôles futurs du GLONASS, dont la précision d'emploi n'est pas affectée par les effets d'un accès sélectif (SA), et du GPS. M. Lyons se propose de prendre contact, au nom du CIPM, avec le Secrétariat américain à la Défense et de lui faire part des remarques du CIPM au sujet de l'importance du GPS pour les organismes chargés des questions horaires dans le monde et des problèmes que leur pose l'accès sélectif.

Le président remercie M. Kovalevsky et demande à M. Iizuka de présenter son rapport sur la session du Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées.

---

\* Lorsqu'il examine une recommandation des comités consultatifs, le CIPM peut, suivant le cas, *a*) adopter la Recommandation, éventuellement avec quelques changements, pour en faire une Recommandation du CIPM, *b*) approuver la Recommandation, en témoignant son soutien au contenu de la Recommandation, mais en considérant qu'il n'est pas justifié d'en faire une recommandation du CIPM, *c*) prendre acte de la Recommandation, lorsqu'il n'est pas favorable au contenu de celle-ci sans toutefois y être fortement opposé, ou *d*) exceptionnellement entreprendre une autre action lorsqu'il désapprouve complètement son contenu.



### 3.2 Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées

M. Iizuka, président du Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM), présente son rapport sur la 5<sup>e</sup> session du CCM qui s'est tenue au BIPM les 9 et 10 juin 1993.

La discussion a essentiellement porté sur les résultats de la troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme (*voir* page G 1). Tous les laboratoires participants ont reçu un certificat concernant leur prototype national. Les certificats donnent la masse du prototype juste après le dernier nettoyage-lavage au BIPM; une annexe donne la masse du prototype à son arrivée au BIPM. En moyenne, la masse des prototypes nationaux a augmenté par rapport à celle du prototype international. Le CCM a adopté la déclaration suivante :

Le CCM, après avoir examiné le rapport et les résultats de la troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme, exprime sa satisfaction du travail accompli et de l'heureux aboutissement de la vérification.

M. Iizuka passe ensuite en revue les rapports des Groupes de travail du CCM : étalons de masse (influence des conditions ambiantes, nettoyage et contamination, comparaison internationale d'étalons secondaires), masse volumique (rapport du CSIRO sur la masse volumique absolue de l'eau et les mesures de dilatation thermique), force (étalonnage de forces élevées) et pressions. Il présente aussi le compte rendu de la réunion du « Club » sur les balances.

Les recherches visant à explorer les possibilités d'une nouvelle définition du kilogramme ont été présentées, et une discussion a eu lieu au sujet des relations entre le CCM et le Groupe de travail du CCE chargé d'examiner les méthodes électriques susceptibles de permettre de contrôler la stabilité du kilogramme.

M. Iizuka termine son rapport en remerciant M. Girard pour avoir mené à bon terme la troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme.

Après discussion, le CIPM adopte la Recommandation G 1 (1993), sur le contrôle de la stabilité du prototype international du kilogramme, comme Recommandation 4 (CI-1993).

M. Crovini évoque certains problèmes que soulèvent les étalons en silicium et remarque qu'il serait nécessaire d'appliquer des corrections importantes de poussée de l'air lors des pesées avec de tels étalons. M. Lounasmaa dit qu'il est urgent de trouver un nouvel étalon de masse, si l'on considère l'alarmant problème de la contamination des étalons par le mercure. M. Kind, bien qu'il trouve intéressant, en principe, d'étudier la mise au point d'une nouvelle définition de l'unité de masse, fait remarquer que le niveau d'exactitude atteint par le kilogramme n'est pas si mauvais.

M. Blevin suggère de tirer profit de la situation actuelle pour souligner l'importance de la physique fondamentale et de la métrologie moderne.

L'étalon primaire de masse, étalon matériel dont la stabilité est difficile à égaler par d'autres techniques, constitue une exception à la règle. M. Quinn est du même avis et dit que les recherches sur une nouvelle définition du kilogramme et sur les balances ont suscité un grand intérêt dans le monde scientifique.

M. Clapham remarque qu'il est difficile de convaincre les responsables financiers et les hommes politiques de la nécessité d'effectuer des recherches fondamentales en métrologie. M. Kind n'a pas la même impression : les responsables financiers de son pays lui ont accordé tout leur soutien. M. Iizuka partage son sentiment.

Le président remercie M. Iizuka et demande à M. Crovini de présenter son rapport sur la session du Comité consultatif de thermométrie.

### 3.3 Comité consultatif de thermométrie

M. Crovini, président du Comité consultatif de thermométrie (CCT), présente le rapport de la 18<sup>e</sup> session du CCT, qui s'est tenue au BIPM du 7 au 9 septembre 1993.

C'était la première réunion qui se tenait après l'adoption de l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90) ; le CCT a donc tout d'abord étudié les progrès réalisés dans la mise en pratique et la dissémination de la nouvelle échelle dans les laboratoires membres du CCT. Les réponses à un questionnaire envoyé aux laboratoires montrent que tous les laboratoires membres réalisent et disséminent l'EIT-90 dans les domaines supérieur et moyen de l'échelle. Plusieurs projets sont à l'étude pour combler les lacunes dans le domaine des basses températures.

Le CCT a étudié certains problèmes relatifs aux valeurs recommandées données dans l'EIT-90 pour  $t_{90} - t_{68}$  dans le domaine de 630 °C à 1064 °C. De nouvelles mesures, réalisées dans le cadre de la préparation des tables de référence internationales pour les thermocouples, ne sont pas en accord avec les valeurs données dans l'EIT-90. Les différences sont dues, pour la plupart, à la non-unicité de l'EIT-68 dans ce domaine. Le CCT a approuvé les nouvelles valeurs et a décidé qu'elles seraient publiées dans *Metrologia*, ainsi qu'une nouvelle table de points fixes secondaires préparée par son Groupe de travail 2.

La nécessité d'une traçabilité des mesures de température au niveau international a été examinée en détail. Cette tâche requiert une coopération étroite à l'intérieur des groupes régionaux et entre ces groupes, comme cela est expliqué dans la Recommandation T 1 (1993) sur la liaison entre les comparaisons régionales en thermométrie.

Le CCT a reconnu qu'il importe encore d'entreprendre d'autres expériences pour déterminer la non-unicité de l'EIT-90 et pour étudier les améliorations qu'il est possible d'apporter aux techniques mises en œuvre pour la réalisation des points fixes de définition. Une attention particulière a été apportée au point triple de l'eau. La Recommandation T 2 (1993),

sur les cellules à point triple de l'eau, encourage les laboratoires nationaux à réaliser des expériences et à fournir des cellules au BIPM.

Le CCT a discuté ensuite de la définition éventuelle d'une échelle internationale de température, fondée sur la courbe de fusion de  $^3\text{He}$ , dans le domaine situé entre 2 mK et 0,65 K. Les membres du CCT estiment qu'il est souhaitable de réaliser une telle échelle, et que celle-ci devrait progressivement rejoindre l'EIT-90. Le CCT a aussi discuté de l'exactitude thermodynamique de l'EIT-90, à la lumière de certaines déterminations récentes. La Recommandation T 3 (1993), sur les mesures de la température thermodynamique, encourage les laboratoires nationaux à poursuivre les mesures de la température thermodynamique au-dessous de 0,65 K, dans les régions voisines de 150 K et de 700 K, ainsi qu'aux températures plus élevées; elle recommande aussi que le BIPM mette à profit l'acquisition d'un radiomètre cryogénique pour participer à ce travail.

Après discussion, le CIPM approuve les Recommandations T 1 et T 2 (1993), et adopte la Recommandation T 3 (1993), sous une forme condensée, comme Recommandation 5 (CI-1993).

M. Siegbahn et M. Lounasmaa ont constaté une grande activité dans les domaines de la physique des basses températures et de la thermodynamique, domaines où le besoin de mesures exactes de température se fait sentir. M. Crovini est du même avis, et ajoute qu'un grand nombre de physiciens travaillent dans ces domaines.

M. Blevin attire l'attention sur le besoin de matériaux de référence pour la conductivité thermique. M. Crovini répond que cette question n'a pas été discutée dans le cadre des réunions du CCT. M. Quinn rappelle aux membres que, lors de sa création, le CCT traitait des questions de thermométrie et de calorimétrie. Le président souligne en conclusion que les compétences et les moyens des comités consultatifs et du BIPM sont limités, et qu'ils doivent concentrer leurs efforts sur les propriétés qui touchent de plus près aux unités du SI.

### 3.4 Réunions futures des comités consultatifs

Le président rappelle aux présidents des comités consultatifs qu'il convient de fixer les dates des prochaines sessions. Les dates suivantes sont retenues :

CCDM	1995
CCDS	aucune date n'est fixée
CCE	aucune date n'est fixée
CCEMRI	12 et 13 avril 1994
CCM	juin 1996
CCPR	14 au 16 septembre 1994
CCT	1996
CCU	aucune date n'est fixée.

#### 4. Travaux du BIPM : Rapport du directeur

##### *Travaux du BIPM*

M. Quinn invite les membres du personnel scientifique du BIPM à présenter les travaux qu'ils ont effectués depuis la précédente session du CIPM, en faisant ressortir ce qu'ils jugent important et en montrant les objectifs de chaque projet. Il rappelle aux membres du CIPM qu'une visite des laboratoires est prévue dans l'après-midi.

L'accent est mis sur les comparaisons internationales organisées par le BIPM (dans le cadre des groupes régionaux) dans le but d'établir une traçabilité des étalons entre eux au plus haut niveau.

La section des longueurs présente en particulier ses travaux sur la *Mise en pratique* de la définition du mètre, le programme des comparaisons internationales, et les recherches pour mettre au point de nouveaux étalons de fréquence et de longueur d'onde dont les radiations puissent être ajoutées à la liste des radiations recommandées.

La section des masses présente les résultats définitifs de la troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme, puis elle résume rapidement le travail de recherche sur l'anélasticité du cuivre-béryllium, sur la balance à suspensions flexibles et sur les effets superficiels relatifs aux étalons en platine-iridié.

La section du temps présente le travail courant sur le TAI et l'UTC et sur l'organisation des comparaisons horaires internationales, ainsi que les études de faisabilité qui seront effectuées en 1994 pour une éventuelle prédiction en temps réel de l'UTC, en tirant profit de l'amélioration de la stabilité des nouvelles horloges commerciales à césium.

La section d'électricité présente le nouveau programme de comparaisons bilatérales visant à établir la traçabilité entre les étalons de résistance et entre les étalons de tension, et décrit l'étude qu'elle a effectuée sur le bruit qui affecte les étalons de tension.

En thermométrie, le travail a été consacré presque uniquement à la vérification des capteurs utilisés en radiométrie. La section de radiométrie présente les résultats de la première comparaison internationale de sensibilité spectrale des photodiodes au silicium, comparaison qui est maintenant terminée. Un radiomètre cryogénique à substitution, qui doit être livré avant la fin de 1993, a été commandé par le BIPM pour fournir une base solide à ses mesures radiométriques.

La section des rayonnements ionisants présente les travaux en dosimétrie des rayons x et  $\gamma$  et leurs applications dans le domaine de la biologie et de la radiothérapie, les activités dans le domaine de la dosimétrie

neutronique, les résultats définitifs de la comparaison internationale de  $^{75}\text{Se}$  et les récents travaux sur les méthodes expérimentales de comptage.

Le président remercie les physiciens pour la présentation fort intéressante des travaux qu'ils ont effectués depuis la précédente session et ceux qu'ils projettent d'entreprendre pour l'avenir. Il constate avec plaisir que la qualité du travail a été maintenue en dépit des restrictions financières, et que les missions du BIPM ont été pleinement remplies.

Au nom du CIPM, il remercie M. Bonhoure, responsable de la section de thermométrie, radiométrie et photométrie, qui prendra sa retraite avant la fin de 1993, pour les quarante années qu'il a passées au BIPM et lui présente tous ses vœux de bonheur pour l'avenir.

M. Bonhoure répond qu'il a été actif pendant de nombreuses années dans le domaine de la thermométrie, et qu'il a toujours apprécié le soutien et les encouragements que lui ont prodigués le CIPM et le BIPM, qui lui ont laissé une grande liberté dans le choix et l'exécution de son travail. Il remercie le CIPM et son président pour ces merveilleuses années.

### *Dépôt des prototypes*

La visite officielle au caveau où sont conservés les prototypes métriques a donné lieu au rapport suivant :

## **Visite du dépôt des prototypes métriques**

### PROCÈS-VERBAL

Le 22 septembre 1993, à 17 h 30, en présence du Président du Comité international des poids et mesures, du Directeur du Bureau international des poids et mesures et du représentant du Conservateur des Archives de France, il a été procédé à la visite du dépôt des prototypes métriques internationaux du Pavillon de Breteuil.

On avait réuni les trois clés qui ouvrent le dépôt : celle qui est confiée au Directeur du Bureau international, celle qui est déposée aux Archives nationales, à Paris et que Madame L. Favier, Inspecteur général chargé du Secrétariat général des Archives nationales, avait apportée, celle enfin dont le Président du Comité international a la garde.

Les deux portes de fer du caveau ayant été ouvertes ainsi que le coffre-fort, on a constaté dans ce dernier la présence des prototypes et de leurs témoins.

On a relevé les indications suivantes sur les instruments de mesure placés dans le coffre-fort :

température actuelle : 21,0 °C  
température maximale\*\* : 21,0 °C  
température minimale\*\* : 19,0 °C  
état hygrométrique : 70 %

On a alors refermé le coffre-fort ainsi que les portes du caveau.

Le Directeur  
du BIPM,  
T. J. QUINN

Pour le Conservateur  
des Archives de France,  
L. FAVIER

Le Président  
du CIPM,  
D. KIND

## **5. Accréditation et certification des laboratoires nationaux de métrologie**

M. Quinn donne lecture du rapport suivant, qu'il a déjà présenté lors d'une réunion d'un Groupe de travail d'EUROMET :

1. Le Comité EUROMET a créé, lors de sa réunion à Delft en 1992, un Groupe de travail sur la stratégie. Dans son rapport à la réunion du Comité EUROMET qui a eu lieu en 1993 à Turin, ce groupe de travail a attiré l'attention sur les pressions que subissent certains laboratoires nationaux en vue d'obtenir la certification selon les normes ISO 9001 ou ISO 9002, ou l'accréditation selon la norme EN 45001 et le Guide ISO 25.

Le Comité EUROMET, à Turin, n'a abouti à aucune conclusion définitive et n'a émis aucune recommandation à ce sujet, mais une stratégie globale s'est dégagée et a reçu l'approbation générale. Selon celle-ci, il est reconnu que, alors que les pressions sont plus ou moins fortes selon les pays, il existe, au niveau mondial, une tendance à rechercher la certification et l'accréditation des laboratoires d'étalonnage et d'essai, et les laboratoires nationaux de métrologie ne sont pas à l'abri de cette tendance. Il est aussi admis que l'accréditation des services d'étalonnage, au sein des laboratoires nationaux, selon la norme EN 45001, est acceptable, mais que l'accréditation ne doit pas s'étendre aux activités de recherche ni à la conservation des étalons nationaux. L'exactitude des étalons nationaux, qu'ils soient primaires ou secondaires, doit être mise en évidence à partir des comparaisons internationales organisées directement par le BIPM sur une base régulière, ou des comparaisons régionales, ou encore des comparaisons bilatérales avec d'autres laboratoires nationaux possédant

---

\*\* depuis la dernière visite.

des étalons primaires. Cette stratégie implique la publication régulière des résultats de ces comparaisons dans *Metrologia*. En ce qui concerne la certification selon les normes ISO 9001 ou ISO 9002, on admet que, tant qu'une telle certification ne concerne que la gestion interne, chaque laboratoire est libre de rechercher ou non la certification à un quelconque niveau. Ce choix sera guidé par les conditions locales.

2. Le terme d'étalon primaire est pris ici dans l'acception qui en est donnée dans le *Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie* (2<sup>e</sup> édition), c'est-à-dire *un étalon qui est désigné ou largement reconnu comme présentant les plus hautes qualités métrologiques et dont la valeur est établie sans se référer à d'autres étalons de la même grandeur* (dans un contexte spécifié). Il faut noter que les étalons primaires ainsi définis peuvent comprendre des étalons d'une grandeur dérivée aussi bien que d'une unité de base du SI. Un étalon secondaire est défini comme *un étalon dont la valeur est établie par comparaison à un étalon primaire de la même grandeur* et un étalon national comme *un étalon reconnu par une décision nationale, dans un pays, pour servir de base à l'attribution de valeurs aux autres étalons de la grandeur concernée*.

Peu de laboratoires nationaux ont les moyens de détenir des étalons primaires dans tous les domaines. Dans la plupart des cas, les laboratoires nationaux conservent en tant qu'étalons nationaux à la fois des étalons primaires et des étalons secondaires. Les étalons secondaires sont, le plus souvent, vérifiés par le BIPM, mais ils peuvent aussi l'être par des laboratoires nationaux.

Il faut noter que la possession d'un étalon national implique des compétences correspondantes tant au niveau de la dissémination de l'unité que de la participation aux comparaisons internationales. Par exemple, la simple possession d'un étalon prototype du kilogramme en platine iridié ne suffit pas à fournir à un laboratoire national un étalon de masse utile. Ce laboratoire doit aussi posséder une balance appropriée et des compétences pour l'utiliser correctement afin de disséminer l'unité de masse. C'est ce niveau global de compétence qui est vérifié lors de la participation aux comparaisons internationales.

3. Si l'on devait utiliser de manière officielle les résultats des comparaisons internationales des étalons nationaux pour démontrer la compétence technique des laboratoires nationaux, il faudrait aborder les comparaisons internationales d'une manière plus structurée qu'on ne le fait à l'heure actuelle.

L'organisation des comparaisons et le choix des étalons à comparer pourraient relever de la compétence des comités consultatifs, en accord avec le BIPM. La périodicité des comparaisons pourrait varier considérablement selon la stabilité des étalons concernés.

4. On peut établir, sans trop de difficultés, une liste des étalons qui sont généralement considérés comme des étalons nationaux, par exemple :

*Masse*

- Les prototypes nationaux du kilogramme en platine iridié, numérotés par le BIPM;

*Longueurs*

- Les lasers asservis sur des transitions atomiques ou moléculaires qui figurent dans la *Mise en pratique* de la définition du mètre;

*Temps*

- Les étalons à césium de laboratoire,
- Les étalons à césium du commerce qui participent au TAI et qui figurent dans la circulaire T du BIPM;

*Électricité*

- Les étalons d'impédance étalonnés directement au moyen d'un condensateur calculable ou d'un étalon de résistance fondé sur l'effet Hall quantique,
- Les étalons du volt fondés sur l'effet Josephson;

*Température*

- Des réalisations directes de l'EIT-90;

*Photométrie, radiométrie*

- Les radiomètres cryogéniques à substitution électrique;

*Rayonnements ionisants*

- Les chambres d'ionisation entièrement évaluées pour la dosimétrie des rayons x et  $\gamma$ .

Bien que cela implique une dépense en temps et en énergie considérable de la part du BIPM et des laboratoires nationaux, la cohérence et l'exactitude de la métrologie au niveau mondial seraient considérablement améliorées par une organisation plus régulière et structurée des comparaisons internationales des étalons nationaux.

Le CIPM invite donc les comités consultatifs à étudier la nécessité de telles comparaisons, à organiser, en collaboration avec le BIPM, les autres comparaisons qui pourraient s'avérer nécessaires et à publier, le moment venu, les résultats de ces comparaisons dans *Metrologia*.

Le CIPM rappelle aussi aux comités consultatifs la nécessité d'assurer une couverture mondiale au moyen de ces comparaisons, en y faisant participer, autant que faire se peut, un ou plusieurs laboratoires appartenant aux diverses organisations régionales (*voir* Recommandation 1 (CI-1992)).

Le président invite ensuite les membres à prendre la parole sur ce sujet.

M. Clapham dit qu'il a discuté de cette question au cours d'une réunion d'un Groupe de travail d'EUROMET, et que le groupe était d'accord avec le document rédigé par M. Quinn. On n'a pu aboutir à aucune conclusion



formelle. Certains laboratoires nationaux de métrologie font l'objet d'une pression considérable de la part des milieux industriels et commerciaux qui veulent les soumettre à l'opération de certification en vue d'obtenir des contrats. Ces laboratoires reconnaissent la nécessité de se conformer aux recommandations publiées dans le Guide ISO 25 pour tout ce qui concerne les questions d'étalonnage et d'essai, mais ce Guide ne s'applique ni aux activités de mesure qui présentent les plus hautes qualités métrologiques ni au travail de recherche. Pour ces activités, certains laboratoires peuvent rechercher la certification selon les normes ISO 9000. D'autres laboratoires font valoir que, à partir du moment où ils ont une existence légale, aucun autre organisme n'est en droit d'exprimer un jugement de valeur sur leurs activités. Par contre, tous les laboratoires reconnaissent la nécessité de faire la preuve de la traçabilité internationale de leurs étalons au moyen des résultats des comparaisons internationales.

Pour M. Kind, il est clair que les laboratoires nationaux de métrologie ne peuvent pas être accrédités par le BIPM. La seule chose que le BIPM puisse faire, c'est organiser plus souvent des comparaisons internationales, et si possible de manière plus structurée, directement ou par l'intermédiaire de ses comités consultatifs, puis de publier les résultats de ces comparaisons, en laissant aux lecteurs le soin d'en tirer les conclusions. Bien que les résultats des comparaisons puissent être utilisés dans une optique scientifique aussi bien que commerciale, en montrant par exemple si un étalon se situe à un niveau comparable à celui de ses pairs, il n'entre pas dans les attributions de la Convention du Mètre de porter un jugement de valeur sur ces étalons ni d'accréditer un laboratoire.

M. Giacomo remarque que le terme de « comparaison internationale » est utilisé avec deux acceptions différentes : 1) les comparaisons qui ont pour objet d'établir et de développer les connaissances sur la manière correcte de mettre en pratique la définition des unités et d'indiquer les incertitudes sur une base solide, d'après les résultats obtenus dans les meilleurs laboratoires, et 2) les comparaisons qui font référence à des méthodes et des dispositifs bien établis, pour démontrer un savoir-faire et des compétences. Il n'aimerait pas voir le BIPM s'engager dans le second type de comparaison.

M. Clapham pense aussi que l'accréditation des laboratoires nationaux de métrologie doit relever de la compétence de chaque État (ou de chaque communauté régionale). Une longue discussion suit. M. Gopal souligne l'importance de la cohérence des résultats de mesure au niveau mondial, et M. Blevin le besoin pressant qu'éprouvent les laboratoires nationaux, sous la pression des milieux industriels et commerciaux, d'obtenir la reconnaissance de leur compétence dans leur propre pays et à l'étranger. M. Crovini rappelle que les organes de la Convention du Mètre doivent se consacrer à la mise en pratique des unités du SI et à la comparaison des réalisations de ces unités, et non aux questions qui relèvent de la métrologie légale.

En conclusion, le président souligne à nouveau l'importance de la publication des résultats des comparaisons dans *Metrologia*; il invite les laboratoires nationaux à en tirer profit et, s'ils le souhaitent, à reproduire ces résultats dans les journaux de leur propre pays.

## 6. La métrologie en chimie

M. Lyons, président du groupe de travail du CIPM sur la métrologie en chimie, présente son rapport sur les résultats de comparaisons préliminaires entre laboratoires, portant sur quelques méthodes de référence. L'étude I porte sur la spectrométrie de masse avec dilution isotopique pour l'analyse de solutions simples de composés inorganiques dans l'eau, solutions préparées par gravimétrie au NIST; l'étude II concerne l'analyse de mélanges gazeux simples, soit par spectrométrie de masse avec dilution isotopique, par spectrométrie de masse de haute exactitude, avec étalonnage externe, par chromatographie en phase gazeuse, par chimiluminescence, ou par spectrométrie infrarouge non-dispersive, selon un protocole établi au Nederlands Meetinstituut.

L'exactitude relative visée pour l'étude I était de  $\pm 1\%$ , mais un petit nombre de laboratoires seulement se trouvaient dans les limites requises. Les résultats semblent meilleurs pour l'étude II, mais le nombre des laboratoires qui ont fait part de leurs résultats est trop restreint pour en tirer des conclusions générales. Les résultats de l'étude I soulignent le besoin d'établir la traçabilité des mesures en chimie.

Certains membres du CIPM demandent comment cette valeur de  $1\%$  a été choisie. M. Lyons répond que c'est la meilleure exactitude que l'on puisse espérer obtenir.

M. Clapham suggère une interprétation différente des résultats. Puisque l'accord international au niveau des références se situe aux environs de  $10\%$ , les divergences supérieures à  $100\%$  qui sont mentionnées dans le travail courant doivent provenir de problèmes qui relèvent de l'assurance de qualité, et non du manque de matériaux de référence appropriés.

MM. Kind et Plebanski sont satisfaits des résultats obtenus par le Groupe de travail; ces résultats démontrent le besoin de donner plus de poids à la métrologie en chimie analytique.

M. Lyons présente ensuite sa proposition, faite conjointement avec le directeur du BIPM, de créer un comité consultatif. Lors de sa 80<sup>e</sup> session en septembre 1991, le CIPM a créé un Groupe de travail sur la métrologie en chimie, dont lui-même, M. Lyons, du NIST, est le président. Ce groupe a été créé à la suite de discussions préliminaires, qui ont eu lieu l'année précédente, et en réponse au rapport du Groupe de travail *ad hoc*, créé en 1990 et chargé de conseiller le CIPM sur l'opportunité de jouer un rôle effectif dans ce domaine.

Le CIPM a été, à juste titre, prudent en ne s'engageant pas trop rapidement dans un domaine dans lequel peu de ses membres ont une

expérience directe. Les arguments donnés par le Groupe de travail *ad hoc* après la réunion qui a eu lieu au NIST en 1991 ont été, toutefois, suffisamment convaincants pour que le CIPM mette en place ce Groupe de travail en septembre 1991.

La mission du Groupe de travail était de mener à bien les comparaisons internationales préliminaires dont il vient de présenter le rapport, afin de juger si l'on peut ainsi établir les fondements d'une traçabilité internationale. En 1991, le Comité a jugé prématuré de demander au Groupe de travail de considérer la possibilité d'établir un comité consultatif dans ce domaine, bien que cela ait été suggéré dans le rapport du Groupe de travail *ad hoc*.

La nécessité d'assurer l'exactitude et la traçabilité internationale des mesures en chimie à tous les niveaux était au centre des discussions, lors de deux réunions qui ont eu lieu depuis septembre 1992.

— En novembre 1992, une réunion a eu lieu au Bureau central des mesures nucléaires (BCM<sup>N</sup>) des Communautés européennes\*\*\*, Geel (Belgique), organisée par le BCM<sup>N</sup> pour Eurachem, sur le thème « Traçabilité et possibilité de comparer les mesures chimiques ».

— En mars 1993 un « International Workshop on the Development of an International Chemical Measurement System » (Atelier international sur la mise en place d'un système international de mesures chimiques) a eu lieu à Atlanta (É.-U. d'Amérique), en liaison avec la Conférence de Pittsburgh sur la chimie analytique. Cette réunion était organisée par le Laboratory of the Government Chemist (Teddington).

Des chimistes, déjà conscients et soucieux des problèmes d'exactitude et de traçabilité, assistaient à ces deux réunions, ainsi que des membres du personnel de laboratoires nationaux de métrologie. Bien que les chimistes aient plus particulièrement mis l'accent sur les difficultés propres à leur travail, les participants étaient en général d'accord pour dire que les problèmes d'exactitude et de traçabilité ne peuvent être résolus sans une coordination internationale des efforts à tous les niveaux. Les deux réunions ont abouti, entre autres, à la conclusion que la seule organisation qui ait pour mission d'établir la traçabilité internationale au SI au plus haut niveau est le CIPM. La charge, à plus long terme, d'établir la traçabilité pour toutes les organisations qui travaillent dans le domaine de la chimie analytique incombe en Europe à Eurachem, en collaboration avec l'Organisation internationale de normalisation (ISO), avec l'aide d'unions internationales telles que l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC) et d'organismes internationaux tels que l'International Laboratory Accreditation Conference (ILAC). Lors de la réunion d'Atlanta, un Groupe de travail « Cooperation on International Traceability in Analytical Chemistry (CITAC) » (Coopération sur la traçabilité internationale en

---

\*\*\* maintenant appelé Institut des matériaux et mesures de référence.

chimie analytique), a été créé en vue de poursuivre cette collaboration et de préparer les réunions futures au cours desquelles les problèmes seront discutés devant une audience aussi large que possible. Lors des réunions de Geel et d'Atlanta, il a été répondu positivement à la demande de présenter le rôle du CIPM dans la métrologie mondiale et de décrire les actions du CIPM à ce jour dans le domaine de la métrologie en chimie.

Une autre initiative importante a été prise par le Comité EUROMET, lors de sa réunion qui a eu lieu en mai 1993 à Turin : la création d'un nouveau domaine de recherches pour EUROMET sur la « quantité de matière ».

Des organisations telles que l'American Society for Testing and Materials (ASTM) et l'Association of Official Analytical Chemists (AOAC) ont organisé pendant de nombreuses années des comparaisons de mesures chimiques entre laboratoires, mais les questions de traçabilité au plus haut niveau n'ont pas été étudiées.

En prenant la direction dans ce domaine, il est essentiel que le CIPM, comme les laboratoires nationaux de métrologie, se consacre uniquement aux mesures du plus haut niveau d'exactitude, et ceci pour deux raisons : tout d'abord parce que la compétence du CIPM et les besoins des laboratoires nationaux se situent à ce niveau, et deuxièmement parce que les organisations qui existent actuellement dans le domaine de l'analyse chimique sont favorables à ce que le CIPM et les laboratoires nationaux établissent une traçabilité internationale du système de mesures chimiques.

M. Lyons dit que lui-même et le directeur du BIPM ont le sentiment que le besoin pressant, ressenti par un public de plus en plus large, d'établir un système de traçabilité international, ainsi qu'en témoignent les événements cités ci-dessus, implique une réaction du Comité plus rapide qu'on ne le jugeait nécessaire il y a deux ans.

L'importance de l'exactitude dans les mesures chimiques, et le fait que, en dernier ressort, les liens fondamentaux avec le SI se font par des méthodes physiques, a obligatoirement pour conséquence l'implication de plus en plus grande des laboratoires nationaux de métrologie dans ce domaine. La récente décision d'EUROMET, citée ci-dessus, en témoigne.

M. Lyons poursuit en disant que le Comité a besoin de faire appel à des avis autorisés dans ce domaine, tout en continuant, au moyen des comparaisons internationales en cours, à mettre à l'épreuve l'hypothèse proposée par le Comité en 1991, en vue d'établir la traçabilité en chimie analytique. L'importance du problème, son caractère à long terme et l'engagement de plus en plus grand des laboratoires nationaux semblent indiquer que la création d'un comité consultatif devient opportune.

En créant maintenant un comité consultatif, le Comité se montrerait décidé à :

a) prendre la direction dans un domaine appelé à prendre de plus en plus d'importance à l'avenir ;

b) répondre de manière adéquate et en temps voulu à des besoins largement reconnus;

c) en définissant clairement les missions du comité consultatif, établir où se situent les limites des responsabilités du CIPM dans ce domaine.

Une longue discussion suit pour savoir s'il est souhaitable ou non de créer maintenant un tel comité consultatif, et quelles seraient ses missions. Certains des membres, tout en n'étant pas opposés à cette décision, ne sont pas satisfaits des missions proposées; après discussion, celles-ci sont modifiées.

M. Plebanski suggère que les missions de ce comité consultatif devraient couvrir très généralement les étalons de mesure en chimie (relatifs à la cinétique chimique, à la thermodynamique, à la chimie des surfaces, aux méthodes spectroscopiques etc.), au lieu de se limiter à la quantité de matière. M. Kind est pour sa part favorable à la création d'un « Comité consultatif pour la quantité de matière », la mole étant la seule unité de base du SI pour laquelle il n'y a pas de comité consultatif.

En conclusion, le CIPM décide d'établir un Comité consultatif pour la quantité de matière dont les missions sont provisoirement les suivantes :

— conseiller le CIPM sur les questions relatives à la traçabilité des mesures chimiques quantitatives aux unités de base du SI;

— coordonner les activités des laboratoires nationaux de métrologie en vue d'établir cette traçabilité au plus haut niveau;

— étudier s'il est nécessaire d'entreprendre un programme de travail au BIPM pour soutenir cette activité.

Le CIPM demande au président du Groupe de travail sur la métrologie en chimie d'assumer la charge de présider ce nouveau comité consultatif, d'entreprendre les consultations nécessaires avant de fixer définitivement ses missions et de proposer au CIPM, lors de la session de 1994, une liste de membres.

M. Plebanski maintient que les missions proposées lui semblent trop restreintes.

Le président rappelle que ces missions sont provisoires. Le comité consultatif travaillera seulement au plus haut niveau d'exactitude, en vue d'établir les liens nécessaires entre les laboratoires nationaux.

## **7. Vingtième Conférence générale des poids et mesures, 1995 : discussion préliminaire**

M. Quinn attire l'attention des membres du CIPM sur le calendrier de la vingtième Conférence générale qui doit se tenir en octobre 1995. La *Convocation* à la Conférence générale doit être distribuée aux États membres avant la fin de décembre 1994, et la version définitive de la *Convocation* doit être approuvée par le CIPM lors de la session

de septembre 1994. Le bureau du Comité commencera à discuter du *Programme de travail et budget* en février 1994.

M. Lyons suggère qu'il serait préférable d'avoir connaissance du *Programme* avant la session de septembre 1994 afin d'avoir une possibilité d'influencer la position des gouvernements des États membres.

M. Kind propose que les grandes lignes du *Programme de travail et budget* ainsi que les chiffres proposés soient soumis au CIPM deux ou trois mois avant la prochaine session.

M. Quinn attire l'attention du Comité sur un aspect important du financement du BIPM, qui diffère de la pratique de la plupart des laboratoires nationaux. Toutes les dépenses du BIPM, qu'il s'agisse de dépenses courantes, d'investissement, d'entretien ou de construction des bâtiments, sont financées sur le budget annuel ou sur les réserves constituées au cours des années précédentes. L'expérience des vingt dernières années a montré que la Conférence générale ne vote pratiquement jamais de budget spécial pour des dépenses d'investissement exceptionnelles. Il est donc essentiel que la Conférence générale vote une dotation qui se situe raisonnablement au-dessus de l'inflation. Le chiffre de 2 % que le CIPM réclame habituellement est un minimum et il est indispensable. La contribution des États membres au BIPM ne représente qu'environ 1 % du budget que chacun de ces États consacre à la métrologie, et c'est un bon investissement pour garantir la cohérence mondiale des étalons de mesure.

## 8. Questions administratives et financières

Le président accueille Mademoiselle Perent, administrateur du BIPM, et présente le *Rapport annuel aux Gouvernements des hautes parties contractantes sur la situation administrative et financière du Bureau international des poids et mesures en 1992*, ainsi que le *Rapport de l'expert comptable pour 1992*. Ces rapports sont approuvés à l'unanimité et quitus est donné au directeur et à l'administrateur du BIPM pour l'exercice 1992.

L'état d'avancement du budget pour l'exercice 1993 est présenté et approuvé. M. Quinn est heureux de dire que la situation financière du BIPM s'est améliorée depuis la précédente session du CIPM, la fédération de Russie ayant versé des sommes importantes en octobre 1992 et en 1993. Les restrictions sur les dépenses décidées en 1992 ont été toutefois maintenues; elles devraient permettre au BIPM de conserver plus de 3 millions de francs-or en réserve, et de disposer ainsi de réserves approchant du montant souhaité des deux tiers du budget annuel vers la fin de 1993.

Les restrictions que le CIPM avait approuvées en septembre 1992 comprenaient aussi le non-remplacement de postes scientifiques de haut niveau, la remise à une date ultérieure de l'engagement d'un chercheur associé et l'annulation d'un autre poste de chercheur associé. Cette situation

ne devrait pas durer trop longtemps. Dans la perspective d'une situation financière meilleure, M. Quinn propose un léger assouplissement des restrictions salariales, en permettant aux salaires de rattraper l'indice au 31 décembre 1993, et en augmentant les allocations familiales de 3,5 % en 1994 (ces dernières sont inférieures de 7,7 % à celles offertes par les organisations coordonnées). Il n'y aura pas de rappel pour les sommes correspondant au décrochement des salaires par rapport à l'indice en 1993, et l'augmentation liée à l'indice en fonction de l'inflation sera à nouveau limitée à 2 % en 1994. Le CIPM approuve cette proposition.

Les membres du CIPM expriment leurs remerciements et leur reconnaissance pour le travail accompli par le personnel dans ces conditions.

Un projet de budget pour 1994 est présenté et approuvé.

Le dernier document soumis au CIPM est le *Tableau de répartition de la dotation pour 1994*.

Il donne lieu à une discussion sur la question des contributions arriérées de certains États membres. M. Quinn informe le CIPM qu'en 1993 le montant des contributions de sept États membres de la Convention du Mètre a été réparti entre les quarante autres États membres, qui ont vu ainsi leur contribution augmenter de 4,4 %. Bien que l'article 6 du *Règlement annexé à la Convention du Mètre* prévoit l'exclusion de la Convention lorsque les contributions d'un État sont restées impayées pendant six ans, cette exclusion n'a jamais été appliquée, et la répartition des contributions continue sans limite. Le ministère des Affaires étrangères de France estime que le texte de la Convention du Mètre n'autorise ni le Gouvernement français ni aucune autre autorité à appliquer la règle d'exclusion. Le seul moyen de sortir de cette situation est de convaincre les États membres de notifier leur intention de se retirer de la Convention. Tant qu'ils ne le font pas, les possibilités sont limitées : ou les autres États membres paient pour les États déficitaires, ou la dotation est réduite. Il est bien entendu que le BIPM suspend tout service aux États qui n'ont pas payé leurs contributions depuis six ans.

### *Promotions*

M. Quinn informe les membres du CIPM que M. Girard a pris sa retraite à la fin du mois de mars 1993 et qu'il a été remplacé par M. Davis à la tête de la section des masses. M. Bonhoure prendra sa retraite à la fin du mois d'octobre 1993 et sera remplacé par M. Köhler. M. Davis a déjà été promu *physicien principal* et M. Quinn propose d'agir de même à l'égard de M. Köhler au moment du départ à la retraite de M. Bonhoure. Il demande aux membres du CIPM d'approuver ces promotions. À l'unanimité, le CIPM approuve les nominations de MM. Davis et Köhler au grade de *physicien principal*.

## BUDGET POUR 1994

### RECETTES

	francs-or
<i>Recettes budgétaires :</i>	
1. Contributions des États . . . . .	23 067 000
2. Intérêts des fonds . . . . .	1 200 000
3. Taxes de vérification . . . . .	126 000
Total . . . . .	<u>24 393 000</u>

### DÉPENSES

<i>A. Dépenses de personnel :</i>		
1. Salaires . . . . .	11 056 000	} 15 678 000
2. Allocations familiales et sociales . . . . .	1 832 000	
3. Assurance maladie . . . . .	979 000	
4. Assurance accidents . . . . .	42 000	
5. Caisse de retraites . . . . .	1 769 000	
<i>B. Dépenses de fonctionnement :</i>		
1. Mobilier . . . . .	30 000	} 3 424 000
2. Laboratoires et ateliers . . . . .	1 140 000	
3. Chauffage, eau, énergie électrique . . . . .	529 000	
4. Assurances . . . . .	77 000	
5. Impressions et publications . . . . .	239 000	
6. Frais de bureau . . . . .	400 000	
7. Voyages et transports d'appareils . . . . .	571 000	
8. Entretien courant . . . . .	390 000	
9. Bureau du Comité . . . . .	48 000	
<i>C. Dépenses d'investissement :</i>		
1. Laboratoires . . . . .	2 430 000	} 2 783 000
2. Atelier de mécanique . . . . .	95 000	
3. Bibliothèque . . . . .	258 000	
D. Bâtiments (gros travaux d'entretien et de rénovation) . . . . .	755 000	
E. Frais divers et imprévus . . . . .	365 000	
F. Fonds de réserve . . . . .	1 388 000	
Total . . . . .	<u>24 393 000</u>	



## *Metrologia*

Le président invite M. Blackburn, rédacteur de *Metrologia*, à assister à la réunion du CIPM pour la discussion sur le budget et le fonctionnement de *Metrologia*.

M. Blackburn informe le CIPM que le volume et le nombre des articles publiés dans *Metrologia* augmentent, et qu'il y a un grand nombre d'articles hautement recommandés en attente de publication. Il rappelle que *Metrologia* est maintenant imprimé par la société Gauthier-Villars afin de mieux respecter les délais de parution, l'ancien imprimeur ayant pris, à une époque, trente-deux semaines de retard sur les dates prévues.

L'exercice 1993 en cours et le projet de budget pour 1994 sont présentés et approuvés.

Le président félicite M. Blackburn et lui présente ses meilleurs vœux pour l'avenir. Il espère que les résultats des comparaisons internationales seront désormais publiés plus souvent dans *Metrologia*.

## 9. Questions diverses

### 9.1 Membres du CIPM

Le président informe le Comité que M. Poustovoit n'a participé à aucune des activités du CIPM depuis la précédente Conférence générale en 1991, qu'il n'a répondu à aucune lettre ni télécopie, ni à aucun des télex que le BIPM ou le CIPM lui ont adressés et qu'il n'a pris part à aucun des votes pour l'élection de nouveaux membres. Dans ces conditions, le président propose que son siège au CIPM soit déclaré vacant. Cette décision est approuvée à l'unanimité des membres du Comité.

Le CIPM, ayant été informé de l'intention de M. Lyons de démissionner du CIPM à la fin de la présente session, une discussion s'ensuit sur les candidats éventuels, car il y a maintenant deux sièges vacants au CIPM.

### 9.2 Groupe de travail sur l'application de la relativité générale à la métrologie

M. Kovalevsky présente le rapport de M. Guinot sur les activités et les missions confiées au Groupe de travail du CCDS sur l'application de la relativité générale à la métrologie, groupe de travail qui a été créé à l'initiative du CIPM lors de sa session de 1992.

Ce groupe de travail a été établi par le CCDS, à la demande du CIPM, en demandant à des experts de considérer les incidences possibles de la relativité générale concernant, en particulier, la métrologie du temps, mais aussi certains aspects de la métrologie des longueurs. M. Kovalevsky présente au Comité ses suggestions quant à la composition de ce groupe de travail. Des unions internationales telles que l'URSI, l'UAI, l'UGGI, l'UIPPA ont été invitées à y participer, ainsi que des représentants du Comité consultatif des unités (CCU) et du Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM). La seule union qui ait répondu et désigné un spécialiste est l'UGGI. Des représentants du CCU et du CCDM ont été nommés par les présidents de ces comités consultatifs.

Il est proposé que le Groupe de travail sur l'application de la relativité générale à la métrologie soit chargé des tâches suivantes :

1. Préparation d'un rapport sur l'interprétation et l'emploi des unités du SI dans le cadre de la théorie de la relativité générale.

Ce rapport devra être orienté vers les applications pratiques dans des champs gravitationnels faibles et à des vitesses basses (par rapport à la vitesse de la lumière). Dans cet esprit il devra indiquer, si possible au moyen d'exemples, quand il devient nécessaire d'apporter un traitement relativiste à des mesures.

En plus de l'interprétation des définitions existantes des unités, il devra donner une définition non ambiguë du Temps atomique international (TAI) et donner une description de la convention de synchronisation pour la métrologie mondiale du temps. Ce rapport devra donner les formules les plus utiles avec des indications sur leur domaine de validité. Il devra proposer un système unifié de notations et de conventions de signe pour les grandeurs qui sont utilisées dans les applications de la relativité.

2. Étude des conséquences de l'accroissement d'exactitude des réalisations des unités du SI.

Au fur et à mesure de l'accroissement de l'exactitude des réalisations des unités du SI, de nouveaux problèmes se posent, en particulier pour le temps et les longueurs. Le groupe de travail devra les aborder en vue de préparer les décisions qui devront être prises, afin de donner satisfaction, dans toute la mesure du possible, à tous les milieux intéressés.

Le CIPM approuve le projet de composition et les missions du groupe de travail.

### **9.3 Prochaine session du CIPM**

Le CIPM décide que la prochaine session du CIPM se tiendra du 27 au 29 septembre 1994.

Le président clôt la 82<sup>e</sup> session du CIPM et remercie tous les participants qui ont contribué au succès de cette réunion.

**Recommandations  
adoptées  
par le Comité international des poids et mesures  
à sa 82<sup>e</sup> session**

---

Exactitude des étalons primaires de fréquence

RECOMMANDATION 1 (CI-1993)

Le Comité international des poids et mesures,

*considérant*

- que l'exactitude relative d'un nombre croissant d'étalons primaires de fréquence approche maintenant  $1 \times 10^{-14}$ ,
- que de nouvelles configurations ont été proposées qui semblent avoir des possibilités encore plus élevées en matière d'exactitude,
- qu'à un niveau d'exactitude de l'ordre de  $1 \times 10^{-14}$  ou mieux on doit tenir compte de corrections qui étaient jusqu'ici considérées comme non significatives ou comme insuffisamment connues,
- qu'une étape essentielle pour établir avec confiance l'exactitude des étalons primaires est de pouvoir comparer entre eux des étalons indépendants de construction différente,

*recommande*

- que différentes configurations d'étalons primaires de fréquence soient réalisées et étudiées en détail, en même temps que les configurations traditionnelles, et comparées entre elles à l'aide des meilleures méthodes disponibles,
- que toutes les corrections, y compris celles qui n'étaient pas jusqu'ici considérées comme significatives, soient étudiées en détail et finalement appliquées,
- que les résultats de ces comparaisons, y compris un bilan complet des incertitudes, soient communiqués au Bureau international des poids et mesures.

## Chronométrie des pulsars-milliseconde

### RECOMMANDATION 2 (CI-1993)

Le Comité international des poids et mesures,

*considérant*

— que la stabilité de la fréquence des pulsars-milliseconde, après correction de sa dérive, est comparable à celle des étalons atomiques de fréquence pour des durées d'intégration supérieures à un an,

— que l'indépendance des données fournies par des pulsars différents peut être mise à profit pour établir une référence encore plus stable en combinant ces données,

*recommande*

— que les observatoires de radioastronomie qui effectuent déjà des observations chronométriques de pulsars-milliseconde poursuivent ces observations de façon régulière et continuent à rechercher de nouveaux pulsars,

— que de nouveaux observatoires mettent en œuvre des programmes d'observation chronométrique de pulsars-milliseconde, avec l'objectif d'un bruit de mesure inférieur à une microseconde,

— que les rapports sur les résultats des mesures chronométriques et les procédés de réduction de ces résultats soient transmis au Bureau international des poids et mesures, étant entendu que la nature confidentielle des résultats peut être respectée si nécessaire.

## Comparaison d'horloges à l'aide de techniques par laser visant des satellites

### RECOMMANDATION 3 (CI-1993)

Le Comité international des poids et mesures,

*considérant*

— que l'on a besoin de comparaisons d'horloges distantes avec la meilleure exactitude possible,

— que des comparaisons d'horloges entre l'Europe de l'Ouest et l'Amérique du Nord ont été réalisées, avec succès, et avec une précision de 100 ps, par l'expérience LASSO (Laser Synchronization from Satellite Orbit),

— que l'exactitude des techniques de comparaison d'horloges, telles que celles qui utilisent les systèmes GPS (Global Positioning System), GLONASS (Global Navigation Satellite System) ou des satellites par des méthodes bidirectionnelles, doit être confirmée par des méthodes indépendantes,

— que des solutions ont été proposées qui peuvent conduire à des comparaisons d'horloges à l'aide de techniques par laser visant des satellites à défilement,

*recommande* que les agences spatiales étudient l'installation sur leurs satellites d'équipements permettant d'effectuer des comparaisons d'horloges utilisant des techniques par laser.

## Contrôle de la stabilité du prototype international du kilogramme

### RECOMMANDATION 4 (CI-1993)

Le Comité international des poids et mesures,

*considérant*

— les résultats de la troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme qui font apparaître des dérives significatives de la masse des prototypes nationaux, des étalons de travail du Bureau international des poids et mesures et des témoins par rapport à celle du prototype international,

— l'impossibilité de tirer de ces résultats, de par leur nature, des conclusions catégoriques quant à la stabilité à long terme du prototype international et des autres prototypes,

— les résultats des recherches effectuées dans de nombreux laboratoires nationaux pour tenter de comprendre les phénomènes qui conduisent à l'instabilité des étalons de masse,

— les progrès actuels obtenus par divers laboratoires dans l'étude de méthodes indépendantes pour contrôler la stabilité des étalons de masse,

*recommande* que les laboratoires poursuivent les recherches entreprises et en explorent de nouvelles afin de contrôler la stabilité du prototype international du kilogramme et, le moment venu, d'ouvrir la voie à une nouvelle définition de l'unité de masse fondée sur des constantes fondamentales ou atomiques.

## Mesures de la température thermodynamique

### RECOMMANDATION 5 (CI-1993)

Le Comité international des poids et mesures,

*considérant*

— l'importance des mesures de haute exactitude de la température thermodynamique déjà soulignée dans la Recommandation T 1 (1987),

— les incompatibilités qui subsistent encore entre les déterminations de la température thermodynamique, en particulier dans les régions voisines de 150 K, 700 K et aux températures plus élevées,

— l'extension souhaitable de l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90) au-dessous de la limite inférieure actuelle de 0,65 K,

— l'importance pour les laboratoires nationaux et pour le Bureau international des poids et mesures de disposer de mesures de la température thermodynamique utilisant des techniques variées,

*recommande* que les laboratoires nationaux poursuivent des recherches en thermométrie fondamentale et en particulier des mesures de la température thermodynamique dans les domaines mentionnés ci-dessus.

---



---

RAPPORT DU DIRECTEUR  
SUR L'ACTIVITÉ ET LA GESTION  
DU BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES  
(octobre 1992 - septembre 1993)

---

I. — PERSONNEL

*Promotions*

Richard DAVIS, *physicien*, a été nommé chef de la section des masses à dater du 1<sup>er</sup> avril 1993 et promu *physicien principal*. Cette promotion doit être ratifiée par le CIPM lors de sa session de septembre 1993.

Christian COLAS, *technicien principal*, a été promu *technicien métrologiste*.

François LESUEUR, *technicien principal*, a été promu *technicien métrologiste*.

Ces deux promotions ont pris effet le 1<sup>er</sup> janvier 1993.

*Engagement*

Danielle SAILLARD, née le 19 août 1948 au Havre (Seine-Maritime), précédemment assistante commerciale dans une société privée, a été engagée à temps partiel comme *secrétaire* pour l'administration à dater du 24 mai 1993.

*Chercheur associé*

Leonid VITOUCHKINE, né le 25 mai 1944 à Saint-Pétersbourg (Fédération de Russie), chef du département des mesures de longueur au VNIIM (Fédération de Russie), a été engagé en qualité de chercheur associé à

la section des longueurs à compter du 24 août 1993 pour une durée de deux ans.

### *Étudiants en doctorat*

Peter WOLF, né le 23 janvier 1969 à Kronstadt (Roumanie), B.Sc. (Hons) Physics and Philosophy de l'Université de York (Royaume-Uni), a commencé le 5 octobre 1992 un stage de Postgraduate Research Student, dans la section du temps, pour une durée de trois ans.

Johan ÅMAN, né le 13 octobre 1968 à Lidköping (Suède), M.Sc. in Engineering Physics de l'Université de technologie Chalmers (Suède), a commencé le 12 mai 1993 un stage de Postgraduate Research Student, dans la section des longueurs, pour une période initiale de six mois.

### *Départ*

Georges GIRARD, *physicien principal*, chef de la section des masses, a pris sa retraite le 31 mars 1993 après 48 ans de services dévoués et efficaces, essentiellement consacrés aux mesures de masse. Sa carrière s'est terminée sur un travail remarquable avec l'achèvement de la troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme qu'il a menée à terme avec succès.

## II. — BÂTIMENTS

### *Observatoire*

Construction d'une plateforme pour les antennes du GPS.  
Rénovation d'un laboratoire.

### *Grand Pavillon*

Peinture du plafond de la Grande Salle.  
Poursuite de la remise en état des volets.

### *Bâtiment des lasers*

Rénovation de l'appartement du gardien.

### *Bâtiment des rayonnements ionisants*

Peinture et vernissage des huisseries des portes et fenêtres.

### *Dépendances et parc*

Suppression des deux grands conifères dans la cour.

Élagage de plusieurs grands arbres proches des bâtiments.

Remise en état de l'Allée du Mail, élagage des tilleuls récemment plantés et plantation d'une haie de hêtres.

Installation d'une bouche d'incendie.

Reconstruction d'un mur de soutènement en pierre.

## III. — TRAVAUX SCIENTIFIQUES

### 1. Remarques générales

En présentant le rapport de l'an dernier sur les travaux scientifiques, j'attirais l'attention sur les conséquences des fortes restrictions financières dues à la brusque baisse de 10 % des recettes du BIPM. Par suite des dispositions prises par le CIPM pour étaler les effets de cette réduction sur une période d'environ trois ans et grâce à des règlements d'arriérés effectués par quelques États membres, j'ai le plaisir de constater que la situation financière immédiate s'est beaucoup améliorée pour les travaux scientifiques. En 1993 j'ai été en mesure d'accroître les investissements de laboratoire et ceux-ci ont atteint 90 % du montant qui avait été prévu avant que la réduction de 10 % des recettes n'intervienne.

La troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme est terminée. La plupart des prototypes sont rentrés dans leur pays d'origine, les certificats ont été distribués et un rapport complet sur ce travail a été soumis au CCM; il est publié en annexe au présent rapport p. G 1, afin que les lecteurs puissent avoir une idée claire de l'ensemble de l'opération depuis son début jusqu'à sa fin. Un certain nombre de conclusions peuvent être tirées des résultats. Tout d'abord, il apparaît que la masse de l'ensemble des prototypes nationaux continue d'augmenter par rapport à celle du prototype international; en moyenne cette augmentation est de 0,5  $\mu\text{g}$  par an depuis la deuxième vérification. En second lieu, la reproductibilité des pesées faites à l'aide de la balance NBS-2, d'environ 0,5  $\mu\text{g}$ , est significativement meilleure que la stabilité de la masse de beaucoup de prototypes, laquelle est d'environ 2  $\mu\text{g}$ ; l'incertitude combinée de 2,3  $\mu\text{g}$  donnée pour les résultats de la troisième vérification résulte presque entièrement des variations de la

masse de certains des étalons de travail du BIPM et non des pesées elles-mêmes. Enfin, la décision d'effectuer le nettoyage-lavage des prototypes nationaux comme du prototype international s'est avérée bonne. Dans son ensemble, la troisième vérification a mis en lumière la nécessité de disposer d'une méthode pour relier la masse du prototype international du kilogramme à des constantes atomiques ou fondamentales. Toute méthode susceptible de donner une reproductibilité à long terme meilleure que  $1 \times 10^{-8}$  conviendrait. Il serait alors possible d'établir, sur quelques années seulement, si, oui ou non, la masse du prototype international varie de façon significative. Les autres travaux effectués dans la section des masses ne sont mentionnés que très brièvement pour éviter d'allonger le rapport de façon excessive ; ils seront décrits plus en détail l'an prochain.

Dans la section des longueurs, un temps considérable a été consacré à la rédaction finale de la nouvelle version de la mise en pratique de la définition du mètre, dont les grandes lignes avaient été adoptées par le CCDM et le CIPM en septembre 1992. Ultérieurement, la version définitive, préparée par le BIPM en consultation avec un petit groupe de travail du CCDM, a été adoptée par le CCDM et formellement approuvée par le CIPM. Elle a été publiée dans les *Procès-verbaux du CIPM* de 1992, et doit paraître sous peu dans *Metrologia* et dans le rapport de la réunion du CCDM. En ce qui concerne les mesures de longueur classiques, la vérification d'une série d'étalons à traits et de calibres étalons appartenant à la Pologne est terminée ; il ne reste plus actuellement d'étalons de ce type en attente au BIPM. Il convient à ce sujet de rappeler l'opinion du CCDM : les travaux de ce genre doivent progressivement être abandonnés de façon à accroître l'effort dans le domaine des lasers. La collaboration avec l'équipe de l'ENS (Paris) s'est poursuivie en vue de mesurer la constante de Rydberg. Une nouvelle détermination, plus exacte, a été faite à l'aide du laser du BIPM asservi sur le méthane à  $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$  utilisé comme référence de fréquence. Parmi les longueurs d'onde de laser recommandées dans la nouvelle version de la mise en pratique de la définition du mètre, il y a celles à 515 nm, 543 nm, 612 nm, 633 nm et 3,39  $\mu\text{m}$  qui, toutes, sont conservées ou en cours d'étude au BIPM. La plupart des comparaisons internationales continuent de se faire à 633 nm, mais les avantages présentés par les autres longueurs d'onde peuvent conduire à les utiliser à l'avenir pour les comparaisons. La structure hyperfine de l'iode au voisinage de  $\lambda = 633 \text{ nm}$  a fait l'objet de nouveaux calculs. À  $\lambda = 515 \text{ nm}$ , les recherches ont porté essentiellement sur le nouveau laser  $\text{Ar}^+$  asservi au moyen de la technique de bande latérale en modulation de fréquence. Des problèmes dus à des modes parasites ont entravé les progrès faits sur les lasers asservis à  $\lambda = 543 \text{ nm}$  mais ces problèmes devraient disparaître lorsque les nouveaux tubes laser qui ont été commandés seront installés. À  $\lambda = 612 \text{ nm}$ , des effets dus à la géométrie des lasers, comparables à ceux qui ont été étudiés il y a quelques années sur le laser asservi sur le méthane à  $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ , font l'objet d'une recherche

à la fois théorique et expérimentale. Le laser à CO<sub>2</sub> asservi à  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$  est maintenant en fonctionnement et des expériences sont en cours pour étudier son asservissement ainsi que certains autres paramètres de son fonctionnement ; l'interféromètre de Perot-Fabry de 1,75 m de long qui lui sera associé a été construit. Le BIPM continue d'assurer le remplissage et la fourniture de cuves à iode pour des laboratoires nationaux et d'autres utilisateurs : cinquante de ces cuves ont été préparées depuis le mois d'août 1992.

Dans la section du temps, l'établissement régulier du TAI et de l'UTC continue ; chaque occasion est saisie pour améliorer l'efficacité des calculs et la qualité des informations communiquées aux utilisateurs. À la suite de discussions qui se sont déroulées lors de la réunion du CCDS, certaines modifications ont été apportées à la circulaire T, en particulier les différences [UTC – UTC(k)] et [TAI – TA(k)] sont maintenant données à 1 ns près et non plus à 10 ns près, comme par le passé. Comme c'est le cas depuis un certain nombre d'années, la conformité de l'intervalle unitaire de l'échelle du TAI avec la seconde du SI repose encore presque entièrement sur les données d'un seul laboratoire, la PTB, dont les étalons primaires sont reconnus comme étant les plus exacts. Depuis le mois de juillet 1992, la fréquence du TAI est restée presque constante par référence aux étalons de la PTB, de telle sorte qu'il n'a été appliqué qu'une seule correction de pilotage de fréquence. Il est intéressant de noter que le fait qu'il n'ait pas été nécessaire d'appliquer de correction montre que l'ensemble des horloges qui contribuent actuellement à l'établissement du TAI ne dérive pas par rapport aux étalons primaires les plus exacts. On a constaté une nette amélioration de la qualité des données qui entrent dans l'établissement du TAI. Cela est dû à un certain nombre de facteurs, dont les plus importants sont l'amélioration de la qualité des horloges dans les stations horaires et le fait que presque toutes ces stations comparent maintenant leur réalisation locale de l'UTC en utilisant la méthode des vues simultanées strictes avec le GPS. Ces améliorations dans les données continuent de stimuler nos recherches sur la façon dont on peut améliorer le calcul et la dissémination du TAI. Mise à part la méthode des vues simultanées avec le GPS, nous continuons d'étudier d'autres techniques de comparaison horaire, comme l'utilisation du GLONASS ou de LASSO et les comparaisons par aller et retour. L'application de la relativité générale à la métrologie du temps, qu'un groupe de travail du CCDS est maintenant chargé d'étudier, nous intéresse de plus en plus directement dans nos recherches sur les échelles de temps. Des expériences récentes de comparaisons par aller et retour et au moyen de LASSO ont donné des reproductibilités de quelques centaines de picosecondes. À ce niveau, la correction à apporter aux comparaisons horaires entre horloges à la surface de la Terre, due à la rotation de la Terre (effet connu sous le nom d'effet Sagnac) doit être bien comprise ; une nouvelle formule a été mise au point pour tenir compte des termes correctifs significatifs d'ordre supérieur. La collecte des données concernant

les pulsars continue avec l'idée d'obtenir une échelle de temps des pulsars, qui pourrait être plus stable à long terme (plusieurs années) que le TAI. Nous collaborons dans ce domaine avec des groupes de radio-astronomes, en particulier en leur fournissant les plus récentes versions de TT(BIPM). Une autre activité qui fait appel à une échelle de temps très exacte est l'interférométrie à très longue base (VLBI), qui est utilisée pour établir des systèmes de référence en géodésie et en astrométrie; là aussi, nous collaborons avec des laboratoires qui travaillent dans ce domaine. Le laboratoire de temps du BIPM dispose maintenant d'un récepteur du temps du GPS d'un modèle perfectionné à double fréquence et à canaux multiples que l'on soumet en ce moment à des essais. La possibilité d'obtenir le prêt d'un des nouveaux étalons Hewlett-Packard 5071 A à jet de césium est examinée. Ces horloges d'une conception nouvelle sont très stables; elles présentent un palier de scintillation caractérisé par un écart-type d'Allan de l'ordre de  $6 \times 10^{-15}$  pour des moyennes faites sur des durées comprises entre dix et soixante jours.

Dans la section d'électricité, entre autres points marquants des activités de cette année notons l'installation et l'essai d'un étalon à réseau de jonctions de Josephson de 10 V et l'achèvement d'un étalon de résistance transportable à effet Hall quantique. Avec le nouveau dispositif à réseau de jonctions de Josephson de 10 V, on a obtenu un accord à mieux que  $1 \times 10^{-8}$  par rapport à l'étalon Josephson de 1,018 V, en utilisant le comparateur qui permet de passer de 1,018 V à 10 V. Deux nouvelles comparaisons internationales du réseau de jonctions de Josephson de 1 V ont été faites avec l'OFMET (Suisse) et le VSL/NMi (Pays-Bas); les résultats font apparaître des différences qui ne dépassent pas  $7 \times 10^{-10}$ . Une comparaison précise de la tension de marches demi-entières avec celle de marches entières ordinaires d'un autre réseau de 1 volt confirme à  $3 \times 10^{-10}$  près la relation de Josephson pour les marches demi-entières. Un étalon de résistance transportable à effet Hall quantique avec un nouvel aimant de 11 teslas a été construit et soumis à essai. Cet étalon est conçu pour être transporté dans d'autres laboratoires afin de comparer directement des étalons de résistance à effet Hall quantique sans utiliser les étalons voyageurs traditionnels, dont la stabilité est très inférieure à celle des étalons à effet Hall quantique. Les essais montrent que des résistances peuvent être étalonnées en fonction de  $R_{K-90}$  avec le nouvel équipement à effet Hall quantique avec une incertitude de quelques  $10^{-9}$ . Une technique nouvelle a été conçue et vérifiée expérimentalement, pour assembler des échantillons en série ou en parallèle afin d'obtenir une résistance totale connue avec une grande exactitude. Ce travail vient en complément de celui qui concerne l'étalon à réseau de jonctions de Josephson de 1 volt, qui permet maintenant de relier avec succès les étalons de référence de Josephson de huit laboratoires membres du CCE. Afin d'établir, à l'aide de documents publiés, la traçabilité des étalons de tension et de résistance entre les laboratoires nationaux qui n'utilisent pas directement des étalons de

référence fondés sur l'effet Josephson et l'effet Hall quantique, un nouveau programme de comparaisons bilatérales à l'aide d'étalons conventionnels a été entrepris ; trois laboratoires ont déjà participé à ce programme. Les travaux de recherche sur les étalons de capacité ont été repris après une interruption de plusieurs années. Il est envisagé de déterminer la valeur des étalons de capacité de 10 pF en fonction de la résistance à effet Hall quantique, à l'aide d'un pont de capacité et d'un pont de quadrature ; le pont de capacité est terminé et il a été soumis à des essais. Une étude de la densité spectrale de puissance de bruit électrique est actuellement en cours pour examiner les limites imposées par le bruit à nos étalons de tension et à l'équipement employé pour les comparer. Une étude systématique est entreprise pour analyser l'effet des variations de l'humidité ambiante sur le comportement des étalons de tension à diode de Zener.

Dans la section de radiométrie et de photométrie, la comparaison internationale de la sensibilité spectrale de photodiodes au silicium s'est poursuivie. Quatorze laboratoires nationaux y ont participé. C'est la première comparaison faite au BIPM dans le domaine de la spectroradiométrie. Chaque laboratoire participant a reçu une série de quatre récepteurs, étalonnés et vérifiés au BIPM, comprenant trois photodiodes planes et un récepteur piège constitué de trois photodiodes planes convenablement associées. À leur retour les photodiodes et surtout les récepteurs piège ont généralement montré qu'ils avaient conservé une bonne stabilité pendant toute la durée de la comparaison. Ce n'est que dans le domaine de l'ultraviolet que l'on a observé des changements significatifs, dus apparemment à un effet de vieillissement résultant de l'exposition aux ultraviolets. Les résultats de la comparaison devraient être diffusés aux laboratoires participants avant la fin de l'année 1993, ce qui permettra de les étudier et d'en discuter à la session du CCPR qui doit se tenir au mois de septembre 1994. Cinq autres laboratoires ont fait part de l'intérêt qu'ils portaient à la comparaison après que celle-ci eut commencé ; une seconde série de comparaisons est actuellement en cours pour inclure ces cinq laboratoires. Une étude théorique et expérimentale des effets de la diffraction pour des ouvertures de forme quelconque a commencé afin d'établir des méthodes numériques permettant d'effectuer des calculs de diffraction avec une exactitude de quelques  $10^{-5}$ . L'amélioration des radiomètres absolus fait appel à des calculs de ce genre et il est apparu que les méthodes numériques et analytiques habituelles utilisées depuis de nombreuses années ne conviennent pas à ce niveau d'exactitude. Des recherches ont aussi commencé sur la mesure précise de la réflectivité diffuse résiduelle de surfaces supposées spéculaires, en particulier pour des photodiodes. Dans le domaine des mesures de pression et de température, le manobaromètre primaire du BIPM a été remis en état ; il est maintenant à nouveau en service. Les étalonnages dans l'EIT-90 de thermomètres à résistance de platine pour les autres sections du BIPM sont maintenant faits à la demande.

Dans la section des rayonnements ionisants, le travail se répartit en deux grandes catégories, la dosimétrie et les radionucléides. Dans le domaine de la dosimétrie, pour les rayons  $x$  et  $\gamma$ , nous avons trouvé que le facteur d'étalonnage des étalons secondaires (chambres d'ionisation), en termes de kerma dans l'air, dans un faisceau de  $^{60}\text{Co}$ , dépend faiblement mais de façon significative du spectre du faisceau. Dans les comparaisons internationales d'étalons de kerma dans l'air, cette influence contribue à l'incertitude globale. On a observé une faible diminution des valeurs mesurées de la dose absorbée dans l'eau,  $D_w$ , utilisant la source de 90 TBq installée en 1987; il n'est pas encore évident que cette diminution soit due à des impuretés dans la source ou à l'équipement de mesure. Des comparaisons sont en cours entre les valeurs de  $D_w$  calculées selon un code bien établi par l'AIEA et les valeurs expérimentales obtenues directement; les résultats concordent à  $\pm 1$  % près. Parmi les étalonnages faits cette année trois lots de dosimètres thermoluminescents ont été étalonnés pour l'AIEA. Cela renforce la traçabilité au BIPM des soixante-douze laboratoires du réseau des SSDL de l'AIEA. L'installation de la nouvelle source de  $^{137}\text{Cs}$  est en cours. En dosimétrie neutronique, la comparaison internationale de mesures de fluence neutronique se poursuit. On pense que cette comparaison, qui comprend six laboratoires participants, s'achèvera au milieu de l'année 1995. La fonction de réponse et l'efficacité de détection du scintillateur liquide du BIPM ont été calculées à l'aide des programmes de Monte Carlo fournis par la PTB. Les résultats des calculs sont en bon accord avec ceux qui ont été obtenus de façon expérimentale. L'étalonnage d'une source neutronique de Am-Be en utilisant la méthode du bain de manganèse est actuellement en cours. Dans le domaine des radionucléides, le rapport final de la comparaison internationale de mesures d'activité du  $^{75}\text{Se}$  est en voie d'achèvement. Un projet de ce rapport avait fait l'objet d'une discussion lors de la récente réunion de la Section II du CCEMRI. Vingt-et-un laboratoires ont participé aux mesures de comparaison, qui sont intrinsèquement difficiles par suite de la présence d'un état métastable dans le schéma de désintégration de ce nucléide. Cette année, les travaux sur les statistiques de comptage ont comporté une étude de la statistique d'un processus de Poisson après division et l'examen d'une proposition pour un dispositif nouveau de correction immédiate de temps morts. Nous pensons que cette proposition, connue sous le nom de méthode de Galushka, lorsqu'elle est correctement mise en œuvre du point de vue électronique, peut s'avérer utile et commode pour de nombreuses recherches bien qu'elle doive être utilisée avec précaution car certaines corrections ultérieures risquent alors d'être fortement corrélées.

## **1.1 Publications, conférences et voyages ne concernant pas directement une section particulière**

### **1.1.1 Publication extérieure**

QUINN T. J., News from the BIPM, *Metrologia*, 1993, **30**, 1-5.



### 1.1.2 Voyages (réunions, visites de laboratoires et d'instituts)

T. J. Quinn s'est rendu :

— à Baltimore (É.-U. d'Amérique), les 5 et 6 octobre 1992, pour assister à la conférence NEWRAD'92 sur la radiométrie ;

— à Querétaro (Mexique), les 7 et 8 octobre 1992, où il a prononcé une conférence intitulée « The BIPM and world metrology » à l'occasion d'une réunion de NORAMET organisée par le Centro Nacional de Metrologia ;

— à Boulder (É.-U. d'Amérique), les 9 et 10 octobre 1992, où il a visité le Joint Institute for Laboratory Astrophysics ;

— à Ottawa (Canada), du 11 au 14 octobre 1992, où il a participé à une réunion du NRC Advisory Committee de l'Institut des étalons nationaux de mesure ;

— à Bruxelles (Belgique), le 22 octobre 1992, où il a participé à une réunion du BCR Advisory Committee of the Commission of the European Communities et présenté son Evaluation Report sur le BCR ;

— à Londres (Royaume-Uni), le 9 novembre 1992 et le 5 avril 1993, où il a participé aux réunions du comité de rédaction de *Reports on Progress in Physics* ;

— à Geel (Belgique), du 10 au 12 novembre 1992, où il a participé à une réunion de l'Eurachem Workshop au Central Bureau for Nuclear Measurements on metrology in chemistry et où il a présenté des conférences sur le « Role of the BIPM in world metrology » et la « Traceability in physical measurements » ;

— à Turin (Italie), le 16 décembre 1992, le 31 mars et le 7 juillet 1993, pour assister à des réunions du conseil scientifique de l'IMGC ;

— à Braunschweig (Allemagne), les 13 et 14 janvier 1993, où il a visité la PTB ;

— à Ottawa (Canada), les 11 et 12 février 1993, où il a participé à une réunion du NRC Advisory Committee de l'Institut des étalons nationaux de mesure ;

— à Washington DC (É.-U. d'Amérique), le 10 mars 1993, où il a visité le NIST ;

— à Atlanta (É.-U. d'Amérique), les 11 et 12 mars 1993, où il a participé à une réunion sur le « Development of an International Chemical Measurement System » organisée en liaison avec la Pittsburgh Conference ;

— à Pise (Italie), les 7 et 8 avril 1993, où il a participé au symposium STEP (Satellite Test of the Equivalence Principle) et présenté une conférence sur la mesure de l'inhomogénéité de la masse volumique dans les métaux ;

— à Turin (Italie), les 13 et 14 mai 1993, où il a participé à une réunion de l'EUROMET Committee ;

— à Bruxelles (Belgique), le 24 mai 1993, où il a participé à un symposium du WECC sur la traçabilité et le marché européen et présenté une conférence sur « BIPM and Traceability of Measurement Standards » ;

— à Genève (Suisse), le 8 juin 1993, où il a participé à une réunion de l'ISO TAG 4;

— à Culham (Royaume-Uni), le 21 juin 1993, pour visiter le Joint European Torus;

— à Teddington (Royaume-Uni), les 22 et 23 juin 1993, au NPL, où se tenait une réunion du bureau du Comité;

— à Lisbonne (Espagne), le 9 août 1993, pour une réunion de l'IDCNS de l'UICPA.

D. A. Blackburn s'est rendu :

— à Erice (Italie), du 13 au 17 octobre 1992, où il a participé à un atelier sur la « Standardization of quantities of interest in interdisciplinary research and their symbols »;

— à Santa Maria Imbaro (Italie), du 18 au 22 juillet 1993, où il a participé à la « Seventh Conference and General Assembly of the International Federation of Science Editors ».

## 1.2 Activités en liaison avec des organismes extérieurs

T. J. Quinn participe régulièrement aux réunions du conseil scientifique de l'IMGC (Turin); il est maintenant membre du CODATA Task Group on Fundamental Constants après en avoir été le président pendant six ans; il est membre de l'IUPAC Interdivisional Committee on Nomenclature and Symbols, de l'Advisory Committee de l'Institut des étalons nationaux de mesure du NRC (Ottawa) et du Comité scientifique du Laboratoire de l'horloge atomique (Orsay). Il est membre du comité de rédaction de *Reports on Progress in Physics*, revue de l'Institute of Physics. Il a présidé un groupe d'évaluation mis sur pied par la Commission européenne pour examiner les activités de cette commission dans le domaine des mesures et des essais dans le cadre du programme du BCR. Il est membre d'un groupe de travail de physique fondamentale de l'Agence spatiale européenne.

## 2. Longueurs (J.-M. Chartier)

### 2.1 Remarques générales

Cette année encore une partie importante de l'activité du BIPM dans le domaine des longueurs a été consacrée aux tâches liées au CCDM. Le texte final de la version révisée de la « Mise en pratique de la définition du mètre », en particulier celui de la liste des radiations recommandées et des trois annexes qui l'accompagnent, a été mis au point en collaboration avec un petit groupe de travail du CCDM. L'étroite collaboration avec l'ENS (Paris) s'est poursuivie et une nouvelle valeur de la constante de Rydberg, fondée entièrement sur des mesures de fréquence, a été obtenue. La prochaine étape de cette recherche consistera en une expérience originale dans laquelle les transitions à deux photons  $5S_{1/2}$  et  $5D_{3/2}$  du rubidium

à  $\lambda \approx 778$  nm servent à relier la fréquence du laser à (He-Ne)/CH<sub>4</sub> à  $\lambda \approx 3,39$   $\mu$ m avec celle du laser à (He-Ne)/I<sub>2</sub> à  $\lambda \approx 633$  nm. Des comparaisons internationales de lasers asservis à  $\lambda \approx 633$  nm ont été faites avec le Portugal, les É.-U. d'Amérique et le Canada. La charge du travail de remplissage et de vérification des cuves à iode s'est encore accrue; cette année cinquante cuves ont été préparées pour divers laboratoires.

## 2.2 Mesures de longueur classiques (L. Robertsson, J.-M. Chartier)

Trois calibres étalons à bouts plans de 500 mm, 700 mm et 800 mm ont été étalonnés pour le PKNM (Varsovie). La médiocre planéité des faces de ces calibres en a rendu l'étalonnage difficile. Pour la même raison, un quatrième calibre de 1000 mm appartenant à ce laboratoire n'a pas pu être étalonné.

## 2.3 Lasers

### 2.3.1 Lasers à argon asservis sur l'iode en cuve externe à $\lambda \approx 515$ nm (L. Robertsson, S. Picard, R. Goebel)

Le travail a porté essentiellement sur un nouveau laser asservi à Ar<sup>+</sup>, BIAR2. L'asservissement sur l'iode a été réalisé au moyen de la technique de bande latérale en modulation de fréquence. Des mesures préliminaires de battements entre BIAR2 et le laser asservi BIAR1, prêté par la PTB, ont commencé. Afin d'obtenir une largeur de raie du laser plus étroite, la boucle d'asservissement rapide utilisée pour corriger les fluctuations de fréquence du laser a été améliorée. En plus d'une boucle à basse fréquence, à grande dynamique, actionnant une céramique piézoélectrique, on utilise un cristal électro-optique à l'intérieur de la cavité, alimenté par deux boucles d'asservissement de bandes passantes différentes, chacune agissant sur l'une ou l'autre face du cristal. La figure 2.1 montre la densité spectrale du bruit de fréquence résiduel après activation successive des trois boucles différentes. La courbe en pointillé correspond à une estimation de la largeur de raie du laser en fonctionnement libre. Ce niveau provient d'un bruit de modulation de fréquence important aux environs de quelques centaines de hertz. La largeur de raie résiduelle est estimée à quelques kilohertz pour une bande passante de 100 kHz, lorsque les trois boucles sont connectées.

Les premières mesures de battements entre BIAR1 et BIAR2 ont été faites. Pour le moment l'écart-type d'Allan relatif combiné pour les deux lasers est d'environ  $8 \times 10^{-13}$  pour une durée d'intégration de 1 seconde et atteint quelques  $10^{-13}$  après 3 secondes. La contribution la plus importante à cet écart-type semble être celle de BIAR1.

Une comparaison directe de la fréquence de ces deux lasers asservis sur la même composante a été faite en décalant la fréquence de l'un d'eux

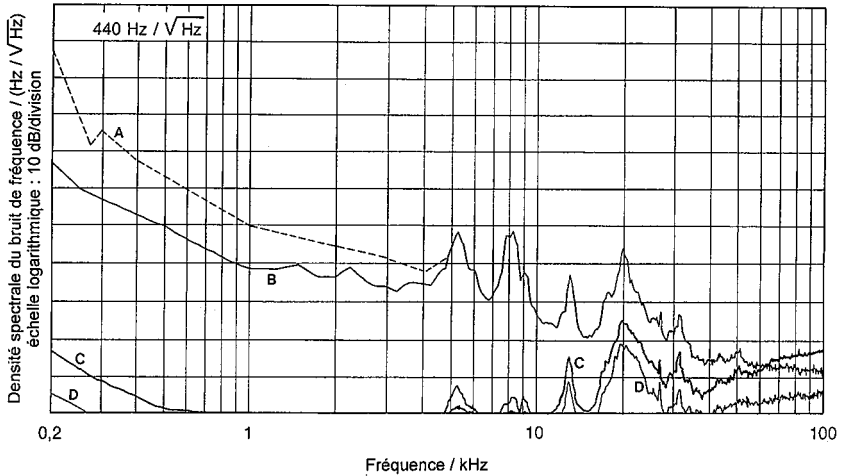


Fig. 2.1. — Densité spectrale du bruit de fréquence résiduel pour différents régimes d'asservissement; A : laser non asservi; B : boucle lente connectée; C : boucles lente et moyenne connectées; D : boucles lente, moyenne et rapide connectées.

à l'aide d'un modulateur acousto-optique. Trente-quatre composantes des transitions 43-0, P(13) et 43-0, R(15) ont été comparées de cette façon. Pour des composantes bien isolées telles que  $a_1 \dots a_4$  les différences de fréquence étaient inférieures à 2,5 kHz, mais pour d'autres composantes les différences pouvaient atteindre entre 10 kHz et 20 kHz. Il se peut que ces différences résultent d'effets différents des composantes voisines selon que l'on utilise l'une ou l'autre des deux techniques spectroscopiques. La différence de fréquence pour la composante de référence  $a_3$  était inférieure à 1 kHz. Il ne semble pas que les deux techniques spectroscopiques entraînent des différences de fréquence significatives pour des composantes bien séparées.

### 2.3.2 Lasers à He-Ne asservis sur l'absorption saturée de l'iode en cuve externe à $\lambda \approx 543,5 \text{ nm}$ (J.-M. Chartier)

Dans le courant de l'année, deux lasers asservis appartenant au BIPM, GRENE1 et GRENE2, ont été remis à neuf. Les principales modifications concernent la conception mécanique et comportent le remplacement des anciens tubes lasers avec miroirs scellés par des tubes avec un miroir scellé et une fenêtre à l'incidence de Brewster. Ces modifications permettent un large éventail de possibilités de compensation pour la longueur de la cavité.

Actuellement, seul le laser GRENE2 fonctionne et un mode parasite inhérent à la géométrie du tube laser apparaît de façon aléatoire. Malgré cela, en utilisant la technique des battements de fréquence, nous avons étalonné un laser asservi sur deux modes à polarisations orthogonales. Ce laser, qui appartient au LNE (Paris), présente lui aussi des problèmes de modes parasites. Nous espérons éviter ce problème à l'avenir en

utilisant de nouveaux tubes lasers qui sont conçus pour fonctionner sur une fréquence unique. La qualité des tubes lasers est maintenant critique car ils fonctionnent à l'une des longueurs d'onde recommandées par le CCDM lors de sa dernière session.

### 2.3.3 Lasers à He-Ne asservis sur l'absorption saturée de l'iode en cuve interne ou externe à $\lambda \approx 612$ nm (L. Robertsson)

On sait depuis longtemps que, dans les systèmes à He-Ne/CH<sub>4</sub>, la taille et la position du récepteur servant à détecter le signal de modulation ont une influence sur la fréquence des lasers. On a trouvé des effets comparables sur les lasers BIOR3 et BIOR4 à  $\lambda \approx 612$  nm. Dans les deux cas le problème a été partiellement résolu en introduisant une lentille pour concentrer la lumière sur la surface du récepteur.

Nous avons fait une étude systématique de cet effet en mesurant, dans diverses conditions, la répartition des signaux de la composante  $3f$  dans la section droite du faisceau du laser, dans le plan du récepteur, et nous avons trouvé une inhomogénéité spatiale du signal qui dépend de la position de la fréquence du laser par rapport à la raie d'absorption.

Une modélisation a été faite dans laquelle les composantes spectrales d'un faisceau laser modulé traversent la cuve d'absorption d'une façon qui est dépendante de la fréquence, en raison de l'effet d'auto-focalisation, et atteint le plan du récepteur en produisant une inhomogénéité spatiale du signal de la composante  $3f$ . L'évaluation chiffrée du modèle est en bon accord avec les résultats expérimentaux, mais à condition de renforcer notablement l'effet d'auto-focalisation [9].

### 2.3.4 Lasers à He-Ne asservis sur l'absorption saturée de l'iode en cuve interne à $\lambda \approx 633$ nm (J.-M. Chartier)

#### i) Comparaison entre lasers appartenant au BIPM

Un décalage de fréquence de quelques kilohertz a été confirmé pour les lasers BIPM2 et BIPM3 après le remplacement du tube de gain CW radiation par des tubes de gain NEC GLT 2700.

Les comparaisons faites avec le laser BIPM4 ont donné :

en janvier 1993	$f_{\text{BIPM2}} - f_{\text{BIPM4}} = + 3,8$ kHz,	$s = 1,3$ kHz,
en août 1993	$f_{\text{BIPM2}} - f_{\text{BIPM4}} = - 1,6$ kHz,	$s = 1,9$ kHz,
en mars 1993	$f_{\text{BIPM3}} - f_{\text{BIPM4}} = - 0,5$ kHz,	$s = 1,1$ kHz,
en juin 1993	$f_{\text{BIPM3}} - f_{\text{BIPM4}} = - 0,3$ kHz,	$s = 1,5$ kHz,
en juillet 1993	$f_{\text{BIPM3}} - f_{\text{BIPM4}} = - 3,2$ kHz,	$s = 0,8$ kHz,
en août 1993	$f_{\text{BIPM3}} - f_{\text{BIPM4}} = - 3,6$ kHz,	$s = 3,5$ kHz,

où  $s$  est l'estimation de l'incertitude-type d'une mesure.

Dans les rapports des deux dernières années, nous avons décrit les nouveaux lasers portables à  $\lambda \approx 633$  nm construits au BIPM. Ce type de laser a suscité un grand intérêt de la part des laboratoires nationaux où une version commerciale fabriquée par Axis Instruments (Boulder, É.-U. d'Amérique) est utilisée comme étalon primaire et, dans des gravimètres absolus, comme référence de longueur d'onde.

Actuellement, nous utilisons deux lasers portables de ce type pour des comparaisons internationales effectuées en dehors du BIPM. Entre les mois de juin et d'août 1993, quatre étalonnages de ces lasers (BIPMP1 et BIPMP3) par rapport au laser de référence BIPM4 ont donné les différences moyennes suivantes :

$$\begin{aligned} f_{\text{BIPMP1}} - f_{\text{BIPM4}} &= + 0,6 \text{ kHz}, & s &= 3,2 \text{ kHz}, \\ f_{\text{BIPMP3}} - f_{\text{BIPM4}} &= + 1,3 \text{ kHz}, & s &= 3,8 \text{ kHz}. \end{aligned}$$

ii) *Comparaisons internationales*

Au mois de janvier 1993, le laser Sextant acheté par l'IPQ (Portugal) en 1991 a été apporté au BIPM et comparé au laser de référence BIPM4 par battements de fréquence. Les résultats ont été :

$$f_{\text{IPQ2}} - f_{\text{BIPM4}} = - 2,2 \text{ kHz}, \quad s = 6,0 \text{ kHz}.$$

Au mois de juillet 1993, le laser Axis Instruments ISL101, appartenant au NIST (É.-U. d'Amérique), a été comparé aux deux lasers portables du BIPM, BIPMP1 et BIPMP3, lors d'une visite faite à Boulder (Colorado). Les résultats obtenus sont :

$$\begin{aligned} f_{\text{ISL101}} - f_{\text{BIPMP1}} &= - 0,2 \text{ kHz}, & s &= 0,6 \text{ kHz}; \\ f_{\text{ISL101}} - f_{\text{BIPMP3}} &= - 0,9 \text{ kHz}, & s &= 0,5 \text{ kHz}. \end{aligned}$$

Au mois de juillet 1993, au NIST (Gaithersburg, É.-U. d'Amérique), le laser NIST1 a été comparé au laser BIPMP3. Le résultat obtenu est :

$$f_{\text{NIST1}} - f_{\text{BIPMP3}} = + 40,2 \text{ kHz}, \quad s = 1,8 \text{ kHz}.$$

Après réglage du décalage de tension continue constaté sur l'électronique d'asservissement du laser NIST1, une seconde série de mesures a donné :

$$f_{\text{NIST1}} - f_{\text{BIPMP3}} = - 2,4 \text{ kHz}, \quad s = 1,7 \text{ kHz}.$$

Au mois de septembre 1993, le laser Axis Instruments ISL103 appartenant au NRC (Canada) a été comparé, au BIPM, au laser de référence BIPM4 et les résultats ont donné :

$$f_{\text{ISL103}} - f_{\text{BIPM4}} = + 10,3 \text{ kHz}, \quad s = 1,5 \text{ kHz}.$$

iii) *Divers*

Nous avons aussi étalonné un laser Tesa asservi par effet Zeeman appartenant à l'IPQ. L'étalonnage effectué par battements de fréquence avec le laser BIPM4 a donné :

$$f = 473\,612\,771,0 \text{ MHz,}$$

avec une estimation de l'incertitude-type de la moyenne de 0,3 MHz.

**2.3.5 Lasers à He-Ne asservis sur le méthane en cuve interne ou externe à  $\lambda \approx 3,39 \mu\text{m}$  (R. Felder)**

i) *Montages à cuve interne*

À son retour de l'ENS, après les expériences faites en 1992, le laser VB a été comparé au laser VNIBI par battements de fréquence. La fréquence absolue de VNIBI étant connue, nous avons obtenu pour VB fonctionnant dans des conditions normales :

$$f \text{ (VB)} = 88\,376\,181\,602,6 \text{ kHz, } s = 1,5 \text{ kHz.}$$

Cette valeur diffère de moins de 100 Hz, soit moins de  $1 \times 10^{-12}$  en valeur relative, de celle qui a été obtenue au mois de février 1992 ; cela indique l'absence de modification significative de la fréquence émise par VB depuis cette date.

ii) *Montages à cuve externe*

Par suite de problèmes techniques inattendus, le fabricant a retardé la livraison d'un modulateur acousto-optique de 1,5 GHz à  $\lambda \approx 3,39 \mu\text{m}$ . En conséquence, afin d'étudier la raie E nous avons construit un laser à He-Ne spécial utilisant l'effet Zeeman. Les aimants nécessaires à ce montage ont été aimablement prêtés par P. Cérez du LHA et les modifications mécaniques ont été conçues par l'atelier du BIPM. Cette expérience devrait commencer à l'automne 1993.

iii) *Collaboration avec d'autres laboratoires*

Aux mois de mars et de mai 1993 nous avons pris part à l'ENS (Paris) à une nouvelle détermination de la constante de Rydberg. Comme pour les mesures faites l'an dernier, le laser VB a été utilisé comme laser de référence pour cette expérience. Cette fois-ci la constante de Rydberg a été entièrement déterminée au moyen de mesures de fréquence. Les résultats expérimentaux sont encore en cours d'analyse, mais nous savons d'ores et déjà qu'il n'y a pas de divergence par rapport au résultat précédent. Nous devrions bientôt obtenir la valeur la plus exacte jamais publiée pour la constante de Rydberg.

Profitant du montage expérimental réalisé, nous avons pratiqué la spectroscopie des transitions  $5S_{1/2}$ - $5D_{3/2}$  à deux photons dans le rubidium.

Les résultats préliminaires montrent qu'il devrait être possible de construire un nouvel étalon de fréquence dans le proche infrarouge ( $\lambda \approx 778$  nm) dont les qualités de fonctionnement soient comparables à celles du laser à (He-Ne)/CH<sub>4</sub>. De plus, comme la somme des fréquences émises par ces deux instruments coïncide, à quelques gigahertz près, avec celle du laser à (He-Ne)/I<sub>2</sub> à  $\lambda \approx 633$  nm, il devrait être possible de déterminer cette dernière à quelques 10<sup>-12</sup> près en utilisant un dispositif beaucoup plus simple que les chaînes de multiplication de fréquences existantes. Nous avons l'intention d'entreprendre prochainement cette expérience.

#### iv) Divers

La pompe turbo-moléculaire du banc à vide du système de remplissage de tubes laser a dû être changée trois fois avant que le système fonctionne de façon fiable. Néanmoins nous avons continué nos recherches sur la méthode de remplissage et nous sommes maintenant en mesure de fournir des tubes de laser à He-Ne dont la durée de vie attendue est de plusieurs années.

Le scellement des fenêtres à l'incidence de Brewster selon la méthode de Mallory n'a pas encore donné de résultats vraiment satisfaisants. Des phénomènes physiques inexpliqués altèrent les verres au fluor utilisés pour cette expérience. Pour les éviter, l'atelier du BIPM a réalisé un nouveau montage mécanique qui sera prochainement soumis à des essais.

### 2.3.6 Laser à CO<sub>2</sub> à $\lambda \approx 10,6$ $\mu\text{m}$ (S. Picard)

Les recherches sur un laser asservi à CO<sub>2</sub> se sont poursuivies. Les fréquences propres de la céramique piézoélectrique du laser ont été mesurées et les effets de pression dans le tube laser ont été étudiés. Les variations d'intensité ont été examinées en fonction du comportement thermique du laser. La répartition de l'intensité du faisceau a été déterminée, en mesurant les écarts par rapport à une répartition de type Gaussien. Un récepteur à infrarouge HgCdTe refroidi à l'azote liquide permet d'effectuer des détections jusqu'à 100 MHz. La stabilité directionnelle du faisceau semble satisfaisante. Quelques améliorations mécaniques seront faites vers la fin de l'année 1993. Le laser et ses caractéristiques feront l'objet d'une description détaillée dans un prochain rapport du BIPM.

Dans le même temps un interféromètre de Perot-Fabry de 1,75 m de long environ a été construit et monté. Un système de pompage turbo-moléculaire a été installé, puis testé. La construction du montage optique qui permet l'absorption saturée est en cours.

Quelques modules pour l'électronique d'asservissement du laser et de la cavité ont été construits; d'autres sont en cours. Nous remercions MM. O. Acef et J.-P. Berthet (LPTF) pour l'aide qu'ils nous ont apportée grâce à leurs commentaires.



### 2.3.7 Cuves à iode (J.-M. Chartier, S. Picard)

Depuis le mois d'août 1992, nous avons rempli trente-quatre cuves à iode saturées (type S) et seize cuves à iode non-saturées (appelées maintenant type N). La plupart de ces cuves ont été distribuées, essentiellement à des laboratoires nationaux. Toutes ont été vérifiées en déterminant le taux d'impureté par la technique de fluorescence induite à l'aide d'un laser à  $\lambda \approx 502$  nm et en mesurant le décalage de fréquence par battements à l'aide de lasers à  $\lambda \approx 633$  nm.

### 2.3.8 Structure hyperfine (S. Picard)

La coopération entre M. J. Blabla (CMI), Mme A. Razet (INM) et le BIPM a repris au cours de l'été 1992. Les constantes hyperfines ont été ajustées sur les résultats expérimentaux obtenus par M. Blabla et ses collègues pour les spectres hyperfins de l'iode à  $\lambda \approx 633$  nm à l'aide des cinquième et troisième harmoniques. Les résultats ont été publiés [10]. Les programmes de calcul des structures hyperfines faits au BIPM ont été communiqués à M. F. Bertinotto (IMGC) et à la National Tsing Hua University (Taiwan). Un échange d'informations sur ces questions a eu lieu dans le courant de l'année avec M. Arie (Stanford University).

## 2.4 Publications, conférences et voyages : section des longueurs

### 2.4.1 Publications extérieures

1. CHARTIER J.-M., DARNEDDE H., FRENNEBERG J., HENNINGSSEN J., KÄRN U., PENDRILL L., JIANPEI HU, PETERSEN J. C., POULSEN O., RAMANUJAM P. S., RIEHLE F., ROBERTSSON L., STÄHLBERG B., WAHLGREN H., Intercomparison of Northern European  $^{127}\text{I}_2$ -stabilized He-Ne Lasers at  $\lambda = 633$  nm, *Metrologia*, 1992, **29**, 331-339.
2. CHARTIER J.-M., PICARD-FREDIN S., CHARTIER A., International Comparison of Iodine Cells, *Metrologia*, 1992, **29**, 361-367.
3. CHARTIER J.-M., LABOT J., SASAGAWA G., NIEBAUER T. M., HOLLANDER W., A Portable Iodine Stabilized He-Ne Laser and its Use in an Absolute Gravimeter, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**, 420-422.
4. QUINN T. J., CHARTIER J.-M., A New Type of Iodine Cell for Stabilized Lasers, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**, 405-406.
5. NEZ F., PLIMMER M. D., BOURZEIX S., JULIEN L., BIRABEN F., CAGNAC B., FELDER R., JUNCAR P., MILLERIOUX Y., Towards a Frequency Measurement of the Rydberg Constant using the 2S-8S and 2S-8D Transitions in Hydrogen, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**, 217-221.
6. NEZ F., BIRABEN F., FELDER R., MILLERIOUX Y., Optical Frequency Determination of the Hyperfine Components of the  $5S_{1/2}$ - $5D_{3/2}$  Two-Photon Transitions in Rubidium, *Opt. Commun.*, 1993, **102**, 432-438.

7. NEZ F., PLIMMER M. D., BOURZEIX S., JULIEN L., BIRABEN F., FELDER R., MILLERIOUX Y., DE NATALE P., Absolute Frequency Measurement of the 2S-8S/D Transitions in Atomic Hydrogen, *Proc. ELICOLS '93*, 1993, 11-16.
8. NEZ F., BOURZEIX S., JULIEN L., BIRABEN F., FELDER R., MILLERIOUX Y., Frequency Measurement of the  $5S_{1/2}$ - $5D_{3/2}$  Two-Photon Transition in Rb and Prospect for Measuring the He-Ne/I<sub>2</sub> laser at 633 nm, *Proc. ELICOLS '93*, 1993, 9-10.
9. NEZ F., PLIMMER M. D., BOURZEIX S., JULIEN L., BIRABEN F., FELDER R., MILLERIOUX Y., DE NATALE P., First Pure Frequency Measurement of an Optical Transition in Atomic Hydrogen : Better Determination of the Rydberg Constant, *Europhys. Lett.*, 1993, **24**, 635-640.
10. BLABLA J., PICARD-FREDIN S., RAZET A., On the Fifth-Derivative Spectrum of the Hyperfine Structure of  $^{127}\text{I}_2$  at the 633 nm Wavelength of the Helium-Neon Laser, *Journal of Molecular Spectroscopy*, 1993, **159**, 282-285.

#### 2.4.2 Conférences et exposés

R. Felder a présenté un exposé [7] et un poster [8] à ELICOLS'93, et a contribué à un poster présenté à EQEC'93.

R. Felder, F. Nez, M.D. Plimmer, S. Bourzeix, L. Julien, F. Biraben, et P. De Natale, ont présenté, à la conférence EGAS'93, un poster intitulé « Frequency Measurement of the Rydberg Constant in Atomic Hydrogen », voir *25th EGAS Abstracts*, 1993 (P1-057).

L. Robertsson a fait un exposé à la Chalmers University of Technology, Göteborg, Suède, le 22 avril 1993, intitulé « Line-Shape Distortions Due to Self-Focusing Effects in Saturation Spectroscopy Using Frequency-Modulated Techniques ».

L. Robertsson a présenté, à la conférence ELICOLS'93, un poster intitulé « Systematic Frequency Shifts Related to Detector Geometry Observed in Laser Systems Stabilized by Saturated Absorption », voir *ELICOLS '93 Digest*, 1993.

#### 2.4.3 Voyages (réunions, visites de laboratoires et d'instituts)

J.-M. Chartier s'est rendu :

— au JILA et chez Axis Instruments (Boulder, É.-U. d'Amérique), du 20 au 24 septembre 1992, pour vérifier les performances de deux lasers portables du BIPM à He-Ne asservis sur l'iode à  $\lambda \approx 633$  nm ;

— au CEM (Madrid, Espagne), le 5 et le 6 novembre 1992, pour vérifier le fonctionnement du laser de référence à He-Ne du CEM, asservi sur l'iode à  $\lambda \approx 633$  nm ;

— à l'Institut polytechnique des Sciences appliquées (Paris, France), le 15 décembre 1992, comme membre du jury d'un mémoire d'ingénieur ;

- au LHA (Orsay, France), le 22 janvier 1993, comme membre du jury d'une thèse pour l'obtention du diplôme de Docteur en sciences ;
- au LNE (Paris, France), le 22 mars 1993 ;
- à l'ETCA (Arcueil, France), le 23 mars 1993 ;
- au DSS (Bangkok, Thaïlande), du 14 avril au 1<sup>er</sup> mai 1993, comme expert invité par les Nations unies pour organiser la création de la Dimensional and Engineering Division du DSS ; il y a fait huit conférences ;
- à l'École nationale supérieure des Sciences appliquées et de technologie (Lannion, France), le 16 juin 1993, comme membre du jury d'une thèse pour l'obtention du diplôme de Docteur en sciences ;
- au JILA et chez Axis Instruments (Boulder, É.-U. d'Amérique), du 24 au 29 juillet 1993, et au NIST (Gaithersburg, É.-U. d'Amérique), du 29 au 31 juillet 1993, pour faire des comparaisons de lasers asservis sur l'iode à  $\lambda \approx 633$  nm.

R. Felder s'est rendu :

- au LPTF (Paris, France), du 12 au 19 mai 1993 ;
- à Hot Springs (Virginie, É.-U. d'Amérique), du 13 au 18 juin 1993, pour participer à la conférence ELICOLS'93 ;
- à Limoges (France), du 6 au 8 septembre 1993, pour participer à la conférence COLOQ 3.

L. Robertsson s'est rendu :

- à Hot Springs (Virginie, É.-U. d'Amérique), du 13 au 18 juin 1993, pour participer à la conférence ELICOLS'93 ;
- chez Axis Instruments (Boulder, É.-U. d'Amérique), du 19 juin au 4 juillet 1993, pour surveiller les dernières étapes de la construction du gravimètre absolu acheté par le BIPM ;
- au JILA (Boulder, É.-U. d'Amérique), du 5 juillet au 2 août 1993, pour vérifier le fonctionnement du gravimètre absolu BIPM-Axis.

S. Picard s'est rendue :

- à l'IMGC (Turin, Italie), du 19 au 20 octobre 1992.

## 2.5 Visiteurs de la section des longueurs

### 2.5.1 Stagiaires

M. Z. Ramotowski (PKNM, Varsovie, Pologne), du 30 novembre au 15 décembre 1992, a pris part à l'étalonnage des étalons à bouts de son laboratoire.

Mme F. Lettaô Dasilva Saraiva et M. J.-J. Dacosta Guedelha (IPQ, Lisbonne, Portugal), du 11 au 21 janvier 1993, ont participé à une comparaison de lasers à  $\lambda \approx 633$  nm appartenant à leur institut avec ceux du BIPM.

M. Wanchai Chinchusak (DSS, Bangkok, Thaïlande), du 8 mars au 9 avril 1993, s'est initié aux comparaisons de lasers par battements de fréquence.

M. P. Zemanek (Institute of Scientific Instruments, Brno, Rép. tchèque) a fait un stage de formation, du 7 au 18 juin 1993, dans le domaine des lasers asservis.

M. T. Niebauer (Axis Instruments/Micro g, Boulder, É.-U. d'Amérique) est arrivé le 29 septembre 1993 ; il doit passer trois mois dans la section des longueurs pour vérifier le fonctionnement du nouveau gravimètre absolu du BIPM.

### 2.5.2 Visiteurs

M. N. Brown (CSIRO, Lindfield, Australie), 14 septembre 1992.

MM. L. de França Lima et L. A. Chiste Biandão (Centro Tecnico Aeroespacial, São Paulo, Brésil) et J. P. Nénon (Bureau de normalisation de l'aéronautique, Issy-les-Moulineaux, France), 5 octobre 1992.

M. P. Connes (Service d'aéronomie du CNRS, Verrières-le-Buisson, France), 26 octobre 1992.

M. H. Imai (NRLM, Tsukuba, Japon), 29 octobre 1992.

M. A. Etchebefiere (INMETRO, Rio de Janeiro, Brésil) et Mme L. Contier de Freitas (LNMRI, Rio de Janeiro, Brésil), 4 novembre 1992.

M. Y. Kurita (NRLM, Tsukuba, Japon), 9 novembre 1992.

Un groupe de visiteurs de l'ONERA (Massy-Palaiseau, France), 26 novembre 1992.

M. A. Barbe (Laboratoire de spectroscopie moléculaire, Faculté de Reims, France), 17 décembre 1992.

M. J. Faller (JILA, Boulder, É.-U. d'Amérique), 28 janvier 1993.

M. H. Haitjema (NMI, Delft, Pays-Bas), 1<sup>er</sup> mars 1993.

Mme G. Lypinski (LNE, Paris, France), 12 mars 1993.

MM. J.-J. Plateaux, A. Barbe, D. Décatoire, P. Van Der Heyden (Laboratoire de spectroscopie moléculaire, Faculté de Reims, France), 16 mars 1993.

M. Ma Long Sheng (Department of Physics, East China Normal University, Shanghai, Rép. pop. de Chine), 22-23 mars 1993.

M. P. Fisk (CSIRO, Lindfield, Australie), 26 mars 1993.

MM. Somsak Maneeratanakul et Sun Jhitkraiakroun (DSS, Bangkok, Thaïlande), 29 mars 1993.

M. G. W. Chamberlin (NIST, Gaithersburg, É.-U. d'Amérique), Mme B. D. Sennewald, MM. J. L. Kuehl, C. B. Randolph, T. E. Zsirai (architectes, Henningson, Durham, Richardson Inc, Alexandria, É.-U. d'Amérique), 7 mai 1993.

M. A. Michaud (Université Laval, Canada), 10-14 mai 1993.

M. J. L. Hall (JILA, Boulder, É.-U. d'Amérique) et M. Ma Long Sheng (Department of Physics, East China Normal University, Shanghai, Rép. pop. de Chine), 18 mai 1993.

M. C. M. Sutton (MSL/IRL, Lower Hutt, Nouvelle-Zélande), 1<sup>er</sup> juin 1993.

M. L. Pendrill (SP, Borås, Suède), 9 juin 1993.

M. U. Berzins (University of Latvia, Riga, Lettonie), 20 juillet 1993.

M. H. Talvitie (MRI, Helsinki, Finlande), 20 juillet 1993.

### **3. Masse et grandeurs apparentées (G. Girard, R. S. Davis)**

G. Girard a pris sa retraite en avril 1993 et a été remplacé par R. S. Davis à la tête de la section des masses.

#### **3.1 Troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme (G. Girard)**

L'état d'avancement de la troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme a été décrit dans les rapports précédents (*voir* le Rapport du directeur de 1989 p. 128, de 1990 p. 118 et de 1991 p. 156). La vérification est maintenant complètement achevée et fait l'objet d'un rapport détaillé de G. Girard (*voir* annexe p. G 1).

#### **3.2 La nouvelle balance à suspensions flexibles FB-2 (T. J. Quinn, A. Picard)**

Le contrôle de positionnement du transporteur de masses a été encore amélioré à l'aide d'un asservissement complémentaire. Le fléau, les suspensions et les plateaux ont été montés.

#### **3.3 Effets de surface sur les étalons de masse en Pt-Ir (T. J. Quinn, A. Picard)**

Les mesures des effets de surface sur les étalons de masse en Pt-Ir ont été étendues au vide. On dispose seulement de résultats préliminaires qui, jusqu'à maintenant, sont difficiles à interpréter.

#### **3.4 Anélasticité des lames flexibles et des fils de torsion (T. J. Quinn, R. S. Davis, C. C. Speake\*, W. Tew\*\*)**

Pour tenter de comprendre les phénomènes d'anélasticité, on a étudié le comportement de fils de torsion en Cu-Be. On a constaté que les pertes dues à l'anélasticité ne dépendaient pas de la charge, au contraire de ce qui se passe pour des lames flexibles dont l'étude se poursuit.

---

\* School of Physics and Space Research, University of Birmingham, Royaume-Uni.

\*\* Chemical Science and Technology Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, É.-U. d'Amérique.

### 3.5 Effets magnétiques sur les pesées (R. S. Davis)

La technique mise au point au BIPM pour mesurer la susceptibilité magnétique a été adaptée pour déceler et évaluer la magnétisation rémanente dans les étalons de masse.

### 3.6 Gravimétrie (A. Sakuma)

Les études se poursuivent sur les propriétés des trièdres optiques utilisés comme corps en chute libre dans les gravimètres. L'Association internationale de géodésie, en collaboration avec le BIPM, organise une quatrième comparaison internationale de gravimètres qui aura lieu au BIPM au mois de juin 1994.

### 3.7 Publications, conférences et voyages : section des masses

#### 3.7.1 Publications extérieures

1. DAVIS R. S., New method to measure magnetic susceptibility, *Meas. Sci. Technol.*, 1993, **4**, 141-147.
2. DAVIS R. S., KOCH W. F., "Mass and Density Determinations" In *Physical Methods of Chemistry*, Rossiter B.W. and Baetzold R.C. eds., second edition, Volume **6**, Wiley & Sons (New York), 1992, 1-99.

#### 3.7.2 Voyages (réunions, visites de laboratoires et d'instituts)

R. S. Davis :

— a visité le DFM (Lyngby, Danemark), les 21 et 22 septembre 1992, pour aider ce laboratoire à établir son programme dans le domaine des masses. Il en a profité pour tenir un séminaire intitulé « A new method to measure the magnetic susceptibility of mass standards » ;

— a présenté une communication à INTERMAG'93 (13-16 avril 1993, Stockholm, Suède) intitulée « Methods for measuring the magnetic properties of weakly magnetic materials », voir aussi *Digests of INTERNATIONAL MAGNETICS Conference*, 1993, CB-04 ;

— a été invité à faire une conférence au sujet de la troisième vérification des prototypes nationaux du kilogramme au Congress on Mass and its Measurement (15-17 septembre 1993, Modène, Italie) et il y a co-présidé une session technique.

G. Girard :

— a été invité à assister, du 9 au 12 mars 1993, à une réunion d'EUROMET à l'IMGC, Turin (Italie). On lui a demandé de faire une conférence sur la troisième vérification des prototypes nationaux du kilogramme.

A. Picard :

— a présenté une conférence, rédigée en collaboration avec T. J. Quinn, sur la balance à suspensions flexibles du BIPM au Congress on Mass and its Measurement (15-17 septembre 1993, Modène, Italie).

W. Tew :

— en collaboration avec T. J. Quinn, R. S. Davis et C. C. Speake, a donné une conférence à la réunion du mois d'avril de l'American Physical Society, à Washington DC (É.-U. d'Amérique), intitulée « Anelastic loss in BeCu torsion fibers », voir *Bull. APS*, 1993, **38**, 946.

### 3.8 Visiteurs de la section des masses

Dix représentants de Mettler S.A. (Viroflay, France), 9 octobre 1992.

M. G. M. Putera (Direktorat Metrologi, Bandung, Indonésie), 28 octobre 1992.

M. G. Chapman (NRC, Ottawa, Canada), 13 novembre 1992.

M. D. Armitage (NPL, Teddington, Royaume-Uni), 14 janvier 1993.

M. J. A. Robles (CEM, Madrid, Espagne), 19 janvier 1993.

M. C. C. Speake (Université de Birmingham, Royaume-Uni), 29 mars au 2 avril 1993.

M. C. M. Sutton (MSL/IRL, Lower Hutt, Nouvelle-Zélande), 1<sup>er</sup> juin 1993.

Mme M. C. Matilla (CEM, Madrid, Espagne), 21-25 juin 1993.

Mme I. Field (CSIR, Pretoria, Afrique du Sud), 25 août 1993.

Cette liste ne tient pas compte des visites faites pour reprendre les prototypes nationaux du kilogramme ni de celles qui ont eu lieu à l'occasion de la réunion du CCM au mois de juin 1993.

## 4. Temps (C. Thomas)

### 4.1 Temps atomique international (TAI) et Temps universel coordonné (UTC)

En plus de l'établissement régulier des échelles de temps TAI et UTC, et de la préparation du *Rapport annuel de la section du temps du BIPM* pour 1992, volume 5, publié en mai 1993, la section du temps a travaillé à la préparation de la 2<sup>e</sup> réunion des représentants des laboratoires de temps et de la 12<sup>e</sup> session du Comité consultatif pour la définition de la seconde, qui ont eu lieu au BIPM, respectivement, du 22 au 23 mars 1993 et du 24 au 26 mars 1993.

À la suite des discussions tenues lors de ces deux réunions, la présentation de la circulaire T a été modifiée. À partir du numéro T 62, daté du 31 mars 1993, les valeurs [UTC – UTC(k)] et [TAI – TA(k)] sont données à la nanoseconde près (alors qu'elles étaient arrondies à la dizaine de nanosecondes précédemment), sauf pour les laboratoires qui ne sont

pas comparés au réseau international par la méthode des vues simultanées des satellites du GPS. De plus, les valeurs [UTC – temps du GPS] sont maintenant présentées sous une forme plus serrée et une nouvelle section a été créée afin d'ajouter la différence des fréquences normalisées de l'EAL et du TAI.

Comme lors des années précédentes, la conformité de l'intervalle unitaire du TAI avec la seconde du SI repose presque entièrement sur les données d'un seul laboratoire, la PTB, dont les étalons primaires sont bien plus exacts que les autres. Depuis juillet 1992, la fréquence du TAI est restée presque constante par rapport à la fréquence des étalons de la PTB et l'on n'a appliqué qu'une seule correction de « pilotage ».

#### **4.2 Algorithmes pour les échelles de temps (J. Azoubib, C. Thomas)**

La qualité des données de temps utilisées pour le calcul du TAI est en train de s'améliorer rapidement, et cela de deux manières :

— d'une part, on utilise maintenant des vues simultanées strictes des satellites du GPS pour comparer les horloges de tous les laboratoires de temps, au nombre de quarante-cinq, qui maintiennent une réalisation locale de l'UTC, excepté pour six d'entre eux. Ainsi, le bruit blanc de phase dû à la méthode de comparaison se trouve lissé pour des moyennes effectuées sur des durées inférieures à dix jours, pour pratiquement toutes les données de temps utilisées dans le calcul du TAI ;

— d'autre part, on assiste à une augmentation progressive du nombre d'horloges très stables maintenues dans les laboratoires nationaux, par exemple les horloges modèle 5071A commercialisées par Hewlett-Packard et les masers à hydrogène de conception récente. Les données de ces horloges sont maintenant transmises au BIPM.

Une conséquence immédiate de ces nouvelles conditions est l'amélioration de la stabilité à court terme du TAI et de l'UTC. On peut donc raccourcir l'intervalle de base du calcul, égal à soixante jours à l'heure actuelle, ce qui va dans le sens de la réduction du temps d'accès au TAI. Nous sommes maintenant en train de mettre au point une nouvelle version de l'algorithme ALGOS qui réalisera un calcul définitif du TAI chaque mois. Cela est en conformité avec les demandes exprimées par la communauté du temps lors de la 12<sup>e</sup> session du CCDS.

Un point intéressant est à noter : pendant l'année qui vient de s'écouler, on n'a eu besoin que d'une seule correction de « pilotage » pour maintenir l'exactitude du TAI, alors que douze corrections avaient été nécessaires entre juin 1989 et juin 1992. Ces corrections, en fait, compensaient la dérive globale, constatée entre 1986 et 1989, de la fréquence du TAI par rapport à PTB CS1 et PTB CS2. De plus, les effets des nouvelles règles de pondération des horloges, introduites en janvier 1988, ont été étudiés. On a pu montrer que la proportion des horloges à fort poids doit être suffisante pour rendre efficace l'opération qui consiste à faire la moyenne des dérives



de fréquence individuelles des horloges. La proportion optimale, d'environ 20 %, a été atteinte en juin 1992.

#### **4.3 Liaisons horaires (W. Lewandowski, G. Petit, C. Thomas)**

La section du temps du BIPM est intéressée par toute méthode de comparaison d'horloges qui offre une exactitude potentielle de l'ordre de la nanoseconde. Nous prenons donc part aux expériences utilisant le système GLONASS, LASSO et les comparaisons horaires par aller et retour, bien que la méthode des vues simultanées strictes des satellites du GPS reste celle qui est la plus utilisée pour l'établissement du TAI.

##### **4.3.1 Global Positioning System (GPS)**

L'harmonisation des coordonnées d'antennes du GPS dans un référentiel unique (ITRF88), effectuée par le BIPM en juin 1990, est l'objet de continues améliorations. La détermination des corrections différentielles des coordonnées des laboratoires d'extrême-orient demande un effort particulier que l'on est en train de réaliser. Dans ce but, on a renforcé, pour cette région du monde, le programme international de poursuite des satellites n° 21 du GPS établi par le BIPM à titre d'essai le 25 juin 1993.

Une autre de nos activités courantes est la vérification des retards internes différentiels entre les récepteurs du temps du GPS fonctionnant de manière régulière dans les laboratoires qui participent au TAI ou, sur demande spéciale, dans d'autres laboratoires [1, 14, 15]. Deux campagnes d'étalonnage différentiel de récepteurs ont été réalisées cette année : d'abord entre l'Observatoire McDonald (Fort Davis, Texas, É.-U. d'Amérique) et l'Observatoire de la Côte d'Azur (Grasse, France) en janvier 1993 ; ensuite entre l'Observatoire de Paris (France) et le Standards and Calibration Laboratory (Wan Chai, Hong Kong) en mai 1993.

On continue à vérifier la condition de fermeture en combinant trois liaisons horaires, OP-NIST, NIST-CRL et CRL-OP [2] ; on tient compte des retards ionosphériques mesurés aux trois sites, et des éphémérides précises des satellites du GPS fournies par divers centres de l'International Geodynamics Service (IGS) [3]. La condition de fermeture présente encore un écart résiduel, que l'on ne s'explique pas, de quelques nanosecondes pour des moyennes journalières. Nous sommes aussi en train de mettre au point le logiciel nécessaire à l'utilisation des éphémérides précises dans le calcul courant du TAI.

Dans le cadre du Groupe de travail du CCDS sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS (GGTTS), le BIPM a produit un effort considérable afin de clarifier de nombreux points de détail concernant la réduction à court terme des données obtenues. Un document contenant les directives techniques de ce Groupe est en cours de publication, le but

final étant d'implanter un logiciel unifié dans tous les récepteurs du temps du GPS [4]. Le BIPM a pris l'initiative de l'établissement d'un format normalisé pour les fichiers de données, conçu dans le but d'atteindre un niveau d'exactitude inférieur à la nanoseconde. On compte sur l'utilisation de ce format partout dans le monde à partir de 1994.

L'accès direct au temps du GPS, par observation des satellites du bloc II, a été dégradé (de 50 ns à plusieurs centaines de nanosecondes) par la mise en œuvre permanente de l'accès sélectif (SA). On a montré que la procédure de prédiction de Kalman apporte une solution efficace au problème de la restitution précise en temps réel du temps du GPS [5], dans le cas où l'on observe continûment et simultanément quatre satellites. De plus, on a analysé d'un point de vue statistique le bruit dû à l'accès sélectif [6]. Il s'avère que ses effets sont réduits à un niveau inférieur à 10 ns en prenant la moyenne des données provenant de dix satellites observés simultanément sur des durées de 2000 s. Cela donne à penser que la commercialisation de récepteurs du temps du GPS équipés de plusieurs canaux aura un impact considérable sur les travaux de la communauté du temps.

### **4.3.2 Global Navigation Satellite System (GLONASS)**

Des valeurs de [UTC – temps du GLONASS] sont publiées régulièrement dans la circulaire T du BIPM; elles proviennent des observations des satellites du GLONASS, réalisées par P. Daly de l'Université de Leeds (Royaume-Uni).

Le BIPM et l'Institut russe de métrologie pour le temps et l'espace (Moscou) ont organisé ensemble une expérience qui a montré que les comparaisons d'horloges par vues simultanées de satellites du GLONASS ou du GPS sont réalisées avec des performances similaires [7, 8, 9]. Un programme international de poursuite des satellites du GLONASS en vues simultanées sera établi par le BIPM un peu plus tard cette année.

### **4.3.3 Comparaisons horaires par aller et retour**

Le Groupe de travail *ad hoc* du BIPM chargé des comparaisons horaires par aller et retour sur satellite s'est réuni pour la seconde fois à Graz (Autriche), les 27 et 28 octobre 1992, sous la présidence de Mme C. Thomas. Les participants ont remarqué que, depuis la dernière réunion en 1989, la technique par aller et retour sur satellite géostationnaire avait beaucoup progressé, aussi bien en ce qui concerne l'équipement que l'expérimentation [10]. À la suite d'une décision du CCDS lors de sa 12<sup>e</sup> session, ce groupe est devenu le Groupe de travail du CCDS sur les comparaisons d'horloges par aller et retour. Sa prochaine réunion est prévue pour octobre 1993 au NPL (Teddington, Royaume-Uni). Une

liaison horaire expérimentale par aller et retour sera probablement établie entre-temps entre l'Europe et les É.-U. d'Amérique.

#### **4.3.4 Laser Synchronization from Satellite Orbit (LASSO)**

Le BIPM a pris part à une étude comparative de deux méthodes de comparaison d'horloges, l'une utilisant un laser visant un satellite (LASSO), l'autre des vues simultanées des satellites du GPS, étude réalisée entre le Texas et la France [11]. Les deux méthodes donnent des résultats préliminaires qui sont cohérents compte tenu des incertitudes établies, mais qui sont séparés par un écart de l'ordre de 190 ns. Cet écart est probablement dû au fait que l'équipement laser n'est pas étalonné, étalonnage qui devrait être réalisé au cours de l'année 1993. On pense que l'exactitude des comparaisons par la technique LASSO sera meilleure que 1 ns; on a déjà montré que la précision de chaque observation était meilleure que 100 ps.

#### **4.4 Application de la relativité générale à la métrologie du temps** (G. Petit, P. Wolf)

Compte tenu du niveau de précision, meilleur que quelques centaines de picosecondes, obtenu récemment pour des comparaisons d'horloges réalisées par le LASSO et par la technique d'aller et retour, et compte tenu de l'amélioration attendue dans un avenir proche, la correction relativiste à apporter à des comparaisons d'horloges qui seraient réalisées à la picoseconde près a été étudiée d'un point de vue théorique. On a établi une formule pour cette correction, incluant tous les termes supérieurs à 1 ps pour des cas typiques de comparaisons d'horloges dans le voisinage de la terre. Cette étude fait partie d'un projet de recherche plus large, visant à examiner sous tous ses aspects le couplage entre la relativité générale et la métrologie, et en particulier à étudier les conséquences de l'application de la relativité générale à l'établissement et à la dissémination d'échelles de temps présentant une stabilité de l'ordre de quelques  $10^{-18}$ . Ce projet de recherche est lié de façon très étroite aux travaux du groupe de travail du CCDS, présidé par B. Guinot, sur l'application de la relativité générale à la métrologie, groupe formé lors de la 12<sup>e</sup> session du CCDS.

#### **4.5 Pulsars** (G. Petit, C. Thomas, P. Tavella\*)

Les pulsars-milliseconde peuvent, en principe, être considérés comme des horloges stables, dont on peut traiter les données par un algorithme optimisé pour la stabilité. On étudie maintenant comment une telle échelle

---

\* Stagiaire.

de temps des pulsars pourrait être réalisée et quelles implications elle aurait sur le temps atomique [12]. Un point important : une échelle de temps des pulsars pourrait permettre de transférer d'une époque à une autre l'exactitude du temps atomique. Cela apporterait une solution à certains problèmes causés par les pannes éventuelles des étalons atomiques.

La collaboration avec différents groupes de radioastronomes engagés dans l'observation des pulsars se poursuit dans le but d'obtenir des données réelles. La section du temps leur a fourni, en février 1993, la dernière version de la réalisation en temps différé du temps terrestre, TT(BIPM93), et leur a occasionnellement apporté une aide.

## 4.6 Autres activités

### 4.6.1 Laboratoire de temps (C. Thomas)

L'équipement du BIPM comprend maintenant un récepteur du temps du GPS, modèle TTR-4P commercialisé par Allen-Osborne Associates. Cet appareil double fréquence, à plusieurs canaux de réception et à décodage du code P, est en cours d'essai et devrait devenir, pour le BIPM, le récepteur primaire du temps du GPS.

Des discussions sont en cours avec Hewlett-Packard pour le prêt au BIPM d'une horloge commerciale à césium, modèle 5071A. Les horloges de ce type, de conception nouvelle, sont très stables : elles présentent un palier de scintillation correspondant à un écart-type d'Allan de  $6 \times 10^{-15}$  pour des moyennes faites sur des durées de dix à soixante jours.

### 4.6.2 Radio-interférométrie à très longue base (G. Petit)

La radio-interférométrie à très longue base (VLBI) est l'une des techniques les plus précises pour réaliser des systèmes de référence en géodésie et en astrométrie. C'est aussi l'une des techniques les plus exigeantes en matière de stabilité des horloges atomiques pour des moyennes effectuées sur des durées allant de 1 minute à 1 jour. Nous suivons de très près ce qui se fait dans ce domaine grâce à plusieurs collaborations avec l'IGN (Saint-Mandé, France), le Centre national d'études spatiales (Toulouse, France) et l'Observatoire de Paris. Nous participons aussi à l'organisation d'observations de pulsars-milliseconde par la technique de VLBI.

## 4.7 Publications, conférences et voyages : section du temps

### 4.7.1 Publications extérieures

1. IMAE M., AIDA M., GOTO T., MIKI C., LEWANDOWSKI W., THOMAS C., PETIT G., GRANVEAUD M., Calibration Experiments of GPS Time Transfer Receivers and Ionospheric Delay Measuring Receivers between Japan and France, *Proc. 7th EFTF*, 1993, 409-412.

2. LEWANDOWSKI W., PETIT G., THOMAS C., Precision and Accuracy of GPS Time Transfer, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**, 474-479.
3. PETIT G., LEWANDOWSKI W., THOMAS C., Precise GPS ephemerides for time transfer, *Proc. 7th EFTF*, 1993, 417-421.
4. THOMAS C. (on behalf of the GGTTs members), Progress on GPS standardization, *Proc. 24th PTTI*, 1992, 17-30.
5. THOMAS C., Real-time Restitution of GPS Time through a Kalman Estimation, *Metrologia*, 1992, **29**, 397-414.
6. THOMAS C., Real-time restitution of GPS time, *Proc. 7th EFTF*, 1993, 141-146.
7. LEWANDOWSKI W., PETIT G., THOMAS C., CHERENKOV G. T., KOSHELYAEVSKY N. B., PUSHKIN S. B., Comparison of GPS and GLONASS time transfers, *Proc. 24th PTTI*, 1992, 47-58.
8. LEWANDOWSKI W., MOUSSAY P., CHERENKOV G. T., KOSHELYAEVSKY N. B., PUSHKIN S. B., GLONASS common-view time transfer, *Proc. 7th EFTF*, 1993, 147-151.
9. DALY P., KOSHELYAEVSKY N. B., LEWANDOWSKI W., PETIT G., THOMAS C., Comparison of GLONASS and GPS Time Transfers, *Metrologia*, 1993, **30**, 89-94.
10. KIRCHNER D., RESSLER H., GRUDLER P., BAUMONT F., LEWANDOWSKI W., HANSON W., KLEPCZYNSKI W., UHRICH P., Comparison of GPS and Two-Way Satellite Time Transfer Over a Baseline of 800 km, *Metrologia*, 1993, **30**, 183-192.
11. BAUMONT F., GRUDLER P., VEILLET C., WIANT J., LEWANDOWSKI W., PETIT G., Preliminary report on the comparison of LASSO and GPS time transfer, *Proc. 7th EFTF*, 1993, 641-643.
12. PETIT G., THOMAS C., TAVELLA P., An ensemble pulsar time, *Proc. 24th PTTI*, 1992, 73-86.
13. LEWANDOWSKI W., Most recent advances in accurate time transfer, *Proc. Conference Computer Aided Metrology* (en polonais), Volume 2/A, Varsovie, PAN, 1993, 13-43.

#### **4.7.2 Rapports BIPM**

14. LEWANDOWSKI W., THOMAS C., IMAE M., Determination of differential time corrections between GPS time receivers located at the Observatoire de Paris and the Communications Research Laboratory of Tokyo, *Rapport BIPM-93/4*, 1993, 12 pages.
15. THOMAS C., MOUSSAY P., Determination of differential time corrections between GPS time receivers located at the Observatoire de Paris and the Standards and Calibration Laboratory of Hong Kong, *Rapport BIPM-93/5*, 1993, 12 pages.

#### 4.7.3 Conférences et exposés

W. Lewandowski a participé aux réunions du Comité civil du GPS à Albuquerque (É.-U. d'Amérique), du 14 au 15 septembre 1992, et à Falls Church (É.-U. d'Amérique), du 25 au 26 janvier 1993. Il y a présenté des résultats d'étude sur les comparaisons d'horloges par le GPS, le GLONASS, le LASSO et la méthode par aller et retour. Il a présenté les travaux de recherche les plus récents sur diverses techniques de comparaison d'horloges utilisant des satellites pendant la 2<sup>e</sup> réunion des représentants des laboratoires de temps, qui a eu lieu au BIPM les 22 et 23 mars 1993. Il a aussi fait un exposé, le 24 mai 1993, lors d'une conférence sur la métrologie assistée par ordinateur, qui a eu lieu à Varsovie (Pologne).

G. Petit a fait des exposés sur le GPS et sur l'observation des pulsars pendant la 2<sup>e</sup> réunion des représentants des laboratoires de temps, qui a eu lieu au BIPM les 22 et 23 mars 1993. Il a fait deux communications orales, sur le temps des pulsars et sur l'observation des pulsars par radio-interférométrie à très longue base (VLBI), au Forum sur les pulsars qui a eu lieu à Meudon (France) le 26 octobre 1992. Il a aussi donné une conférence sur le temps des pulsars et le temps atomique, au Naval Research Laboratory à Washington DC (É.-U. d'Amérique), le 4 décembre 1992.

C. Thomas a présenté divers aspects du travail de la section du temps pendant la 2<sup>e</sup> réunion des représentants des laboratoires de temps, qui a eu lieu au BIPM les 22 et 23 mars 1993. Elle a aussi fait plusieurs exposés sur le temps au Standards and Calibration Laboratory (Wan Chai, Hong Kong), du 4 au 6 mai 1993, lors du séminaire sur la réception du GPS en vues simultanées, organisé dans le cadre de l'Asia/Pacific Metrology Programme (APMP).

P. Wolf a fait un exposé sur le TAI, considéré comme une réalisation du temps terrestre TT tel qu'il a été défini par l'UAI dans sa résolution A4 (1991), pendant la 2<sup>e</sup> réunion des représentants des laboratoires de temps, qui a eu lieu au BIPM les 22 et 23 mars 1993.

#### 4.7.4 Voyages (réunions, visites de laboratoires et d'instituts)

W. Lewandowski s'est rendu :

— à Albuquerque (É.-U. d'Amérique), du 16 au 18 septembre 1992, pour assister au 5th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS-92);

— à Graz (Autriche), du 27 au 28 octobre 1992, pour participer à la 2<sup>e</sup> réunion du Groupe de travail *ad hoc* du BIPM sur les comparaisons d'horloges par aller et retour;

— à McLean (É.-U. d'Amérique), du 1<sup>er</sup> au 3 décembre 1992, pour assister à la 24<sup>e</sup> réunion du PTTI;

— à Fort Davis (É.-U. d'Amérique), du 4 au 8 décembre 1992, pour installer un équipement de réception du temps du GPS, utile à l'expérimentation du LASSO à l'Observatoire McDonald;

— à Neuchâtel (Suisse), du 16 au 17 mars 1993, pour assister au 7<sup>e</sup> Forum européen fréquence et temps, et pour participer à la réunion du Groupe de coordination du LASSO.

G. Petit s'est rendu :

— à Toulouse (France), les 14 et 15 octobre 1992, pour travailler sur la conception et le développement d'un corrélateur de VLBI au Centre national d'études spatiales;

— à Meudon (France), le 26 octobre 1992, pour assister au Forum sur les pulsars à l'Observatoire de Meudon;

— à Princeton (É.-U. d'Amérique), le 30 novembre 1992, pour une visite à l'Université de Princeton afin de discuter de l'analyse des données des pulsars;

— à McLean (É.-U. d'Amérique), du 1<sup>er</sup> au 3 décembre 1992, pour assister à la 24<sup>e</sup> réunion du PTTI;

— à Washington DC (É.-U. d'Amérique), le 4 décembre 1992, pour une visite au Naval Research Laboratory afin de discuter de l'analyse des données des pulsars;

— à Neuchâtel (Suisse), du 16 au 17 mars 1993, pour assister au 7<sup>e</sup> Forum européen fréquence et temps.

C. Thomas s'est rendue :

— à Graz (Autriche), du 27 au 28 octobre 1992, pour présider la 2<sup>e</sup> réunion du Groupe de travail *ad hoc* du BIPM sur les comparaisons d'horloges par aller et retour;

— à Toulouse (France), le 2 novembre 1992, pour participer à une réunion sur les comparaisons d'horloges par le GPS, au Centre national d'études spatiales;

— à Neuchâtel (Suisse), du 16 au 17 mars 1993, pour présider la session sur les comparaisons d'horloges du 7<sup>e</sup> Forum européen fréquence et temps;

— à Hong Kong, du 1<sup>er</sup> au 9 mai 1993, pour participer au séminaire de l'APMP sur la réception en vue simultanée du GPS.

P. Wolf s'est rendu :

— à Meudon (France), le 26 octobre 1992, pour assister au Forum sur les pulsars à l'Observatoire de Meudon;

— à Londres (Royaume-Uni), du 9 au 12 décembre 1992, pour travailler avec I. W. Rowburgh au Queen Mary and Westfield College;

— à Neuchâtel (Suisse), du 16 au 17 mars 1993, pour assister au 7<sup>e</sup> Forum européen fréquence et temps;

— à Bures-sur-Yvette (France), le 25 mai 1993, pour assister à une journée de discussion sur la gravitation expérimentale, organisée par le Groupe de recherche sur la gravitation;

— à Paris (France), pour assister à différents cours sur la relativité générale à l'École normale supérieure, et sur les systèmes de référence en astronomie à l'Observatoire de Paris.

#### **4.8 Activités en liaison avec des organismes extérieurs**

W. Lewandowski participe aux travaux de l'UGGI.

G. Petit participe aux travaux de l'UAI en tant que membre du Groupe de travail sur les normes astronomiques. Il est membre du conseil scientifique du GRGS (France) et membre du Comité national français de géodésie et géophysique.

C. Thomas est membre du Comité national français de géodésie et géophysique.

#### **4.9 Visiteurs de la section du temps**

##### **4.9.1 Stagiaire**

Mme P. Tavella (IEN, Turin, Italie) a effectué un stage du 3 au 13 novembre 1992, au cours duquel elle a continué à collaborer à l'étude des pulsars.

##### **4.9.2 Visiteurs**

M. D. Davis (NIST, Boulder, É.-U. d'Amérique), 15 octobre 1992.

M. J. Danaher (3S Navigation, Laguna Hills, É.-U. d'Amérique), 9-10 novembre 1992.

M. S. Stein (Timing Solutions Corporation, Boulder, É.-U. d'Amérique), 12 novembre 1992.

M. M. Staniewski (PKNM, Varsovie, Pologne), 23 novembre 1992.

M. R. Barillet (LHA, Orsay, France), 30 novembre 1992.

M. G. Saxena (NPLI, New Delhi, India), 15 décembre 1992.

M. B. Waitzmann (Équipements services techniques, Ris-Orangis, France), 16 février 1993.

M. T. Fayard (CNES, Toulouse, France), 15 mars 1993.

M. M. A. Weiss (NIST, Boulder, É.-U. d'Amérique), 19 mars 1993.

M. D. Sullivan (NIST, Boulder, É.-U. d'Amérique), 29 mars 1993.

M. M. Chow (SCL, Hong Kong), 22 avril 1993.

M. O. Grimaud (Hewlett-Packard, Les Ulis, France), 8 juin 1993.



## 5. Électricité (T. J. Witt)

### 5.1 Résumé des travaux de la section d'électricité en 1993

Parmi les points marquants des activités de cette année se trouve la mise en place et les essais couronnés de succès d'un étalon de 10 V utilisant un réseau de jonctions de Josephson (accord relatif à mieux que  $10^{-8}$  près avec le comparateur 1,018 V/10 V et l'étalon Josephson à 1,018 V). Deux autres comparaisons internationales d'étalons de tension à réseau de jonctions de Josephson ont été accomplies et les résultats montrent que les différences relatives ne dépassent pas  $7 \times 10^{-10}$ . Une comparaison précise de la tension de marches demi-entières avec celle de marches entières ordinaires d'un autre réseau confirme à  $3 \times 10^{-10}$  près la relation de Josephson pour les marches demi-entières.

Un étalon de résistance transportable utilisant l'effet Hall quantique (EHQ) a été assemblé. Il est destiné à être emporté dans d'autres laboratoires pour faire des comparaisons d'installations à EHQ. Les essais montrent qu'avec cet appareil, on peut étalonner des résistances par rapport à  $R_{K-90}$  avec une incertitude relative de quelques  $10^{-9}$ . Une technique nouvelle a été conçue et vérifiée expérimentalement pour assembler en série-parallèle des échantillons EHQ de façon à obtenir une résistance totale métrologiquement exacte.

Pour établir, à l'aide de documents publiés, la traçabilité des étalons de tension et de résistance, un programme de comparaisons bilatérales ouvertes à tous les laboratoires nationaux, à l'aide d'étalons conventionnels, a débuté. Ce programme s'adresse explicitement aux laboratoires qui n'utilisent pas directement des étalons de référence fondés sur l'effet Josephson ou l'EHQ. Trois laboratoires ont déjà participé à ce programme.

### 5.2 Potentiel électrique

#### 5.2.1 Effet Josephson (D. Reymann)

Les comparaisons internationales d'étalons de tension à réseau de jonctions de Josephson ont constitué une partie importante de notre activité. Nous avons transporté notre équipement à l'OFMET (Suisse) en novembre 1992, et au VSL/NMi (Pays-Bas) en mars 1993. Des comparaisons directes et indirectes de la tension des réseaux ont été faites en utilisant le dispositif de transfert de tension et le détecteur de zéro du BIPM. En outre des comparaisons de résultats de mesures d'étalons à diode de Zener ont été faites. Nous avons aussi mis au point de nouvelles méthodes pour améliorer la précision de mesures qui simulent la façon dont les étalons de tension à réseau de jonctions sont utilisés couramment dans les laboratoires nationaux de métrologie. Une méthode consiste à mesurer la tension du dispositif de transfert du BIPM en utilisant de façon indépendante les deux

systèmes de mesures, y compris les détecteurs. L'autre méthode utilise un nouveau dispositif de transfert conçu et réalisé au BIPM. Dans ce dispositif, un étalon de 10 V à diode de Zener est utilisé pour stabiliser le courant traversant un diviseur résistif et produisant une tension de sortie de 1,018 V sous une impédance d'environ 100  $\Omega$ . Un commutateur, placé à l'intérieur de l'appareil, permet d'inverser cette tension. Dans ces mesures, c'est la dérive propre des étalons, et non les forces thermoélectromotrices, qui limite l'incertitude de type A. Cette dernière peut être réduite à 1 nV lorsque les mesures sont menées rapidement et de façon symétrique.

Les résultats de ces comparaisons sont donnés ci-dessous, exprimés comme la différence entre les valeurs qui seraient attribuées à une pile étalon par les différents instruments. Les incertitudes sont les incertitudes combinées (types A et B).

À l'OFMET :

$$U_{\text{OFMET}} - U_{\text{BIPM}} = -0,7 \text{ nV}, \quad \sigma = 0,3 \text{ nV}.$$

Au VSL :

$$U_{\text{VSL}} - U_{\text{BIPM}} = 0,2 \text{ nV}, \quad \sigma = 0,2 \text{ nV}.$$

Des comparaisons avec d'autres laboratoires nationaux sont envisagées en 1994.

Une autre comparaison a été faite au BIPM avec le BNM/LCIE. Il s'agissait d'une comparaison spéciale, le réseau du BNM/LCIE présentant des marches demi-entières. Le but de cette comparaison était de vérifier l'exactitude de la relation de Josephson pour des marches demi-entières. Aucune différence supérieure à l'incertitude de mesure, 0,3 nV, n'a été mise en évidence.

Le NIST vient de faire au BIPM le prêt à long terme d'un réseau de jonctions de 10 V fabriqué au laboratoire de Boulder. Les premières mesures ont été faites en utilisant la nouvelle source à diode Gunn du BIPM produisant une radiation de 100 mW à environ 75 GHz. Les résultats des mesures d'étalons à diode de Zener de 10 V faites avec le réseau de jonctions sont comparés ci-dessous à ceux déduits de notre étalon Josephson à 1,018 V et du comparateur 1,018 V/10 V. Les incertitudes sont uniquement de type A.

$$\begin{aligned} U_{Z(10 \text{ V réseau})} &= 9,999\,944\,36 \text{ V}, & \sigma &= 0,02 \text{ } \mu\text{V}. \\ U_{Z(10 \text{ V réseau} + \text{comparateur})} &= 9,999\,944\,31 \text{ V}, & \sigma &= 0,12 \text{ } \mu\text{V}. \end{aligned}$$

Ces résultats sont très satisfaisants car ils montrent que l'erreur relative due au comparateur 1,018 V/10 V est inférieure à  $1 \times 10^{-8}$ .

Nous remercions le NIST, et particulièrement le groupe de C. A. Hamilton, d'avoir mis ce réseau à la disposition du BIPM. Nous

remercions également la société Advantest (Tokyo, Japon) qui a donné au BIPM un troisième circuit d'asservissement de fréquence pour cet étalon à réseau de 10 V. Ce circuit a été conçu et réalisé par H. Yoshida, ingénieur d'Advantest, stagiaire à l'ETL.

Par ailleurs, nous remercions l'ETL pour le don d'un réseau de 1 V en Nb/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nb obtenu grâce à Y. Sakamoto.

### 5.2.2 Autres activités

Bien que l'humidité relative dans le laboratoire de mesure des tensions soit régulée aux environs de 50 %, les variations entre l'hiver et l'été peuvent s'élever à quelques pour cent. Les sorties à 1,018 V de quelques étalons à diode de Zener montrent des variations à long terme corrélées aux variations d'humidité. Une étude systématique de cet effet est en cours.

## 5.3 Impédance électrique (F. Delahaye)

### 5.3.1 Mise au point d'un étalon de résistance transportable fondé sur l'effet Hall quantique

Un étalon de résistance transportable fondé sur l'effet Hall quantique (EHQ) a été assemblé et essayé avec succès. Il est constitué essentiellement d'un jeu d'échantillons EHQ, d'un cryostat de taille relativement réduite contenant un aimant supraconducteur et un anticryostat à basse température, et d'un pont de mesure de rapport de résistances. L'aimant supraconducteur peut produire une induction magnétique de valeur maximale 11 T à 4,2 K et 13 T à 2,2 K. L'anticryostat à basse température permet d'obtenir une température inférieure à 1,5 K dans la chambre contenant l'échantillon. Le pont utilise un comparateur de courants alternatifs à température ambiante fonctionnant à 1 Hz [5] et permet l'étalonnage de résistances de 1  $\Omega$ , 100  $\Omega$  et 10 000  $\Omega$  en fonction de  $R_{K-90}$  avec une incertitude relative de l'ordre de quelques  $10^{-9}$ . Le BIPM a l'intention de transporter cet équipement dans les laboratoires du CCE intéressés pour réaliser des comparaisons directes d'étalons de résistance à EHQ. Cette approche est semblable à celle qui avait été adoptée par le BIPM lors de la comparaison d'étalons de tension à réseau de jonctions de Josephson.

### 5.3.2 Montage en série-parallèle de dispositifs pour l'effet Hall quantique

La disponibilité au BIPM d'un certain nombre d'échantillons EHQ sensiblement identiques, fabriqués par les Laboratoires d'électronique Philips [6], a motivé une étude de la possibilité d'assemblage de ces dispositifs en série ou en parallèle afin d'obtenir des valeurs métrologiquement exactes de résistance, multiples ou sous-multiples de

la résistance quantifiée. Partant d'un modèle de circuit équivalent, nous avons calculé qu'en utilisant la méthode des liaisons multiples pour réaliser les connexions, les effets de la résistance des contacts au gaz à deux dimensions pouvaient être rendus négligeables. Une expérience menée avec soin a confirmé les résultats de ces calculs [7]. Les applications métrologiques comprennent la réalisation d'étalons de référence exacts dont la valeur est multiple ou sous-multiple de celle de la résistance de Hall quantifiée et de ponts de résistance permettant la comparaison précise de résistances de Hall quantifiées.

### 5.3.3 Mesures de capacités

Nous avons commencé une nouvelle étude dont l'objectif est de mesurer des étalons de capacité de 10 pF à partir de la résistance de Hall quantifiée en utilisant un pont de capacité et un pont de quadrature. Cette année nous avons mis au point un pont de capacité pour rattacher des étalons de capacité de 100 pF et 2000 pF à des étalons de 10 pF. Des enceintes thermorégulées spéciales, ayant une stabilité de température de l'ordre de 1 mK, ont été construites pour deux étalons de 100 pF et deux de 2000 pF. Le travail à venir comprendra la construction d'un pont de quadrature fonctionnant à une fréquence angulaire d'environ  $10^4$  rad/s pour rattacher la capacité de 2000 pF à la résistance de Hall quantifiée, et l'étude de l'effet de la fréquence sur la résistance de Hall quantifiée.

## 5.4 Comparaisons bilatérales d'étalons électriques au BIPM

La poursuite du programme de comparaisons sur place d'étalons Josephson et le nouveau programme de comparaisons internationales de systèmes à EHQ fourniront les meilleurs moyens techniques pour assurer la traçabilité et la cohérence entre les laboratoires équipés de ces étalons quantiques. Cependant la majorité des laboratoires nationaux de métrologie comptent sur le BIPM ou sur de grands laboratoires nationaux pour leur fournir les étalonnages nécessaires à la stabilité au cours du temps de leur représentation nationale du volt et de l'ohm. À la suite de discussions lors de la réunion du CCE en 1992, il est apparu clairement que les étalonnages à eux seuls ne satisfont pas le besoin de traçabilité manifesté par quelques laboratoires. Pour aider à satisfaire ce besoin, nous offrons aujourd'hui à tous les laboratoires nationaux l'accès à un autre type d'étalonnage permettant de rattacher leurs étalons de référence à ceux du BIPM. Nous appelons ce nouveau programme « comparaisons bilatérales » car les procédures sont à peu près les mêmes que celles utilisées lors des récentes comparaisons internationales de résistance, à savoir :

- 1) le laboratoire d'origine mesure les étalons voyageurs par rapport à son étalon de référence national avant et après l'envoi au BIPM, et il communique les résultats et incertitudes au BIPM;

2) le BIPM mesure les étalons voyageurs, donne les valeurs et incertitudes par rapport à ses étalons à effet Josephson ou à EHQ, et calcule la valeur et l'incertitude des différences entre les valeurs données aux étalons voyageurs par les deux laboratoires ;

3) le laboratoire d'origine informe le BIPM de toute modification qu'il entend apporter à son étalon de référence national à la suite de la comparaison ;

4) avec l'accord du laboratoire d'origine, le BIPM publie les résultats de la comparaison, ainsi que les indications portant sur toute modification de son étalon de référence national, dans les *Procès-verbaux du CIPM* et dans *Metrologia*.

À ce jour, trois laboratoires qui conservent actuellement leurs étalons électriques à l'aide de comparaisons avec le BIPM ont participé ou participent à ce nouveau programme de comparaisons internationales. Pour l'un d'entre eux, EOLAS (Dublin, Irlande), le résultat final de la comparaison d'étalons de tension donne, pour la différence entre les valeurs qui seraient attribuées à un étalon de 10 V, et pour l'incertitude totale de la comparaison :

$$U_{(10 \text{ V EOLAS})} - U_{(10 \text{ V BIPM})} = 0,7 \mu\text{V}, \quad \sigma = 3,2 \mu\text{V},$$

soit une différence relative de  $7 \times 10^{-8}$ .

## 5.5 Mesures de bruit des étalons de tension

Nous avons commencé les mesures de densité spectrale de puissance de bruit, pour étudier les limites imposées par le bruit à nos étalons de tension et aux équipements utilisés lors des mesures. Jusqu'à maintenant, nous avons étudié le bruit dans les comparaisons à 1,018 V entre réseau de jonctions, piles étalons, dispositif de transfert de tension et étalons à diode de Zener, ainsi que dans les comparaisons à 10 V entre réseau de jonctions et étalons à diode de Zener. Des mesures similaires ont été faites sur les circuits utilisés pour l'étalonnage des piles étalons et des étalons à diode de Zener. L'étude des détecteurs utilisés pour ces différentes applications nous a permis de déterminer assez précisément les largeurs de bande de bruit équivalent. Pour les piles étalons, nous avons trouvé que le bruit en tension correspond au bruit d'une résistance bobinée de même valeur ohmique que la résistance interne des piles. Pour les étalons à diode de Zener à 1,018 V, même alimentés sur batterie, la densité spectrale de puissance de bruit est 5 à 10 fois plus grande que celle d'une pile étalon et elle décroît avec la fréquence plus lentement que  $1/f$ .

## 5.6 Comparaisons et étalonnages courants

Les étalonnages courants ont porté sur le matériel suivant : piles nues pour l'Autriche; étalons à diode de Zener à 1,018 V et à 10 V pour l'Autriche, la Belgique, le Brésil, l'Irlande et le Portugal; résistances de 1  $\Omega$  pour l'Autriche, la Belgique, le Brésil, l'Espagne et le Portugal; et résistances de 10 k $\Omega$  pour l'Autriche, le Danemark et l'Espagne.

## 5.7 Publications, conférences et voyages : section d'électricité

### 5.7.1 Publications extérieures

1. REYMANN D., IWASA A., YOSHIDA H., ENDO T., WITT T. J., Comparison of Josephson Voltage Standards of the Electrotechnical Laboratory and the Bureau International des Poids et Mesures, *Metrologia*, 1992, **29**, 389-395.
2. REYMANN D., WITT T. J., International Comparisons of Josephson Array Voltage Standards, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**, 596-599.
3. STEINER R. L., CLARK A. F., KISER C., WITT T. J., REYMANN D., Accuracy Comparisons of Josephson Array Systems, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 1993, **3**, 1874-1877.
4. REYMANN D., WOOD B., WITT T. J., Comparison of Josephson Voltage Standards of the National Research Council of Canada and the Bureau International des Poids et Mesures, *Metrologia*, 1993, **30**, 109-111.
5. DELAHAYE F., BOURNAUD D., Accurate AC Measurements of Standard Resistors between 1 Hz and 20 Hz, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**, 287-291.
6. PIQUEMAL F., GENEVÈS G., DELAHAYE F., ANDRÉ J. P., PATILLON J. N., FRIJLINK P., Report on a Joint BIPM-EUROMET Project for the Fabrication of QHE Samples by the LEP, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**, 264-268.
7. DELAHAYE F., Series and parallel connection of multi-terminal quantum Hall effect devices, *Journal of Applied Physics*, 1993, **73**, 7914-7920.
8. WITT T. J., DELAHAYE F., REYMANN D., The Role and Activities of the Electricity Section of the BIPM, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**, 247-250.
9. GENEVÈS G., LO-HIVE J.-P., REYMANN D., WITT T. J., Observation and Precise Measurement of Subharmonic Voltage Steps on a 1V Josephson Junction Array, *Metrologia*, 1993, **30**, 511-512.

### 5.7.2 Conférences et exposés

T. J. Witt a donné une conférence intitulée « Activités récentes de la section d'électricité du BIPM » au VSL, Delft (Pays-Bas), le 18 mars 1993.

D. Reymann et F. Delahaye ont participé à la réunion EUROMET d'experts de l'effet Hall quantique et des étalons à réseau de jonctions de Josephson au DFM, Lyngby (Danemark), les 1<sup>er</sup> et 2 juin 1993. F. Delahaye a présenté les nouvelles du BIPM concernant l'utilisation métrologique de l'effet Hall quantique. D. Reymann a donné les résultats des comparaisons d'étalons à réseau de jonctions faites entre le BIPM et des laboratoires nationaux et a fait part de l'expérience acquise au cours de ces comparaisons.

D. Reymann a suivi l'atelier « Matériaux et instrumentation » de l'école doctorale « Structure Information Matière et Matériaux » de l'université de Caen (France), les 17 et 18 mai 1993, et il y a présenté un exposé intitulé « Utilisation de l'effet Josephson dans la métrologie du volt ».

T. J. Witt a participé à la XXIV<sup>e</sup> assemblée générale de l'URSI à Kyoto (Japon), du 30 août au 1<sup>er</sup> septembre 1993. Le 31 août, il a été invité à donner un exposé intitulé « Métrologie quantique du volt : l'étalon de référence fondé sur l'effet Josephson » (*voir URSI Abstracts* p. 16). Du 1<sup>er</sup> au 9 septembre, il a visité l'ETL et le NRLM, Tsukuba ; le 7 septembre, il a donné un exposé intitulé « Les programmes du BIPM pour comparer, à l'aide d'instruments transportables, les étalons fondés sur l'effet Josephson et l'effet Hall quantique ».

### 5.7.3 Voyages (réunions, visites de laboratoires et d'instituts)

T. J. Witt a participé à la 5<sup>e</sup> réunion des correspondants en électricité d'EUROMET au DFM, Lyngby (Danemark), les 13 et 14 octobre 1992. Il a passé en revue les activités de la section d'électricité du BIPM, en insistant sur les résultats de la comparaison de résistances de 1990, sur les comparaisons d'étalons de tension à réseau de jonctions de Josephson, et sur le programme de comparaisons bilatérales.

T. J. Witt et D. Reymann ont visité l'OFMET, Wabern (Suisse) du 9 au 13 novembre 1992, et le VSL/NMi, Delft (Pays-Bas), du 8 au 12 mars 1993, pour des comparaisons d'étalons à réseau de jonctions de Josephson, des visites de laboratoires et des discussions au sujet de la métrologie des tensions et résistances et des réseaux de jonctions de Josephson.

T. J. Witt a visité Oxford Instruments, Oxford (Royaume-Uni), le 10 décembre 1992, pour discuter des moyens de modifier un cryostat standard muni d'un aimant supraconducteur, de façon à pouvoir le transporter horizontalement. Il a participé aux essais du cryostat et de l'aimant à Oxford, le 22 mars 1993.

T. J. Witt et D. Reymann ont visité le LCIE, Fontenay-aux-Roses (France), le 14 janvier 1993, pour des mesures de la puissance de sortie entre 72 GHz et 75 GHz de la nouvelle source à diode Gunn du BIPM, et le 23 février 1993, pour l'analyse spectrale de sources à diode Gunn.

F. Delahaye a participé à la réunion du Groupe de travail de la CEI chargé de la révision du Vocabulaire des notions fondamentales en électrotechnique, à Londres (Royaume Uni), du 16 au 19 mars 1993.

T. J. Witt a participé à la célébration du trentième anniversaire du centre d'étalonnage d'électricité-magnétisme au LCIE, Fontenay-aux-Roses (France), le 3 juin 1993.

## **5.8 Activités en liaison avec des organismes extérieurs**

F. Delahaye est membre du Groupe de travail de la CEI chargé de la révision du Vocabulaire des notions fondamentales en électrotechnique.

## **5.9 Visiteurs de la section d'électricité**

### **5.9.1 Stagiaires**

MM. J.-P. Lo-Hive et G. Genevès sont venus au BIPM pour des comparaisons de réseaux de jonctions de Josephson, les 7 et 10 mai 1993.

### **5.9.2 Visiteurs**

M. E. T. Frantsuz (VNIIM, Saint-Pétersbourg, Féd. de Russie), le 6 novembre 1992, accompagné par MM. G. Genevès et F. Piquemal (LCIE, Fontenay-aux-Roses, France).

M. Raso (CEM, Madrid, Espagne), 23 novembre 1992.

Mme I. Godinho (LNETI, Lisbonne, Portugal), 1-5 mars et 4 juin 1993.

M. P. Klenovsky, directeur (CMI, Brno, République tchèque), 8 avril 1993.

MM. L. M. Ogino et J. R. da Silva (INMETRO, Rio de Janeiro, Brésil), 24-27 mai 1993.

MM. Pin Peter Chang et Chin-Ping Liang (Institut de recherche industrielle et technologique, Hsinchu, Taiwan), 2 juin 1993.

Mlle M. Chambon (BNM, Paris, France) et M. G. Genevès (LCIE, Fontenay-aux-Roses, France), 8 juin 1993.

MM. C. Rhee et D. Chi (KRIS, Taejon, Rép. de Corée), 10 septembre 1993.

M. K. H. Yoo (KRIS, Taejon, Rép. de Corée), 16 et 17 septembre 1993.



## 6. Radiométrie, photométrie, thermométrie et manométrie (J. Bonhoure)

### 6.1 Radiométrie (R. Köhler, R. Goebel)

La comparaison internationale de sensibilité spectrale de photodiodes au silicium s'est poursuivie tout au long de l'année. Jusqu'à maintenant, quatorze laboratoires nationaux ont participé aux mesures. Chaque laboratoire a reçu un jeu de quatre récepteurs : trois photodiodes Hamamatsu type S-1337-1010BQ et un récepteur piège, conçu et réalisé au BIPM, formé de trois photodiodes du même type. Un quinzième jeu de quatre récepteurs a été conservé au BIPM pour servir de référence. La sensibilité spectrale relative de toutes les photodiodes a été mesurée au moins deux fois à chacune des dix-neuf longueurs d'onde retenues dans le domaine spectral allant de 248 nm à 1000 nm. Auparavant, des mesures avaient été faites pour bien préciser les caractéristiques des photodiodes.

Les participants avaient cinq mois pour déterminer la sensibilité spectrale absolue des récepteurs, puis les renvoyer au BIPM accompagnés des résultats d'étalonnage. Au retour, tous les récepteurs ont été soumis aux mêmes séries de mesures qu'avant leur départ, pour s'assurer qu'ils n'avaient subi aucun dommage et que leur sensibilité n'avait pas varié. Dans l'ensemble, les photodiodes et les récepteurs pièges ont fait preuve d'une très bonne stabilité pendant la comparaison. On observe une légère dégradation de la stabilité seulement dans l'ultraviolet, sorte de vieillissement dû à l'éclairement énergétique aux courtes longueurs d'onde. Les résultats seront disponibles en 1994 sous la forme d'un rapport BIPM.

Alors que la comparaison était déjà bien avancée, quatre autres laboratoires ont manifesté le désir de participer à la comparaison. Aucun jeu de récepteurs n'étant en réserve, on a décidé que, dès la fin du premier tour de mesures, les récepteurs rendus disponibles seraient envoyés aux nouveaux participants. Ainsi la comparaison complète portera sur les échelles de dix-huit laboratoires nationaux, plus le BIPM.

L'amélioration récente de l'exactitude en radiométrie a conduit à des limites plus critiques sur tous les phénomènes physiques associés, la diffraction par exemple. Des études ont déjà été effectuées (*voir Rapport 1991, p. 66*), mais le problème a été réexaminé et une étude théorique plus poussée a été réalisée au cours de l'année. Le résultat de cette étude est une expression simple, qui permet le calcul numérique des effets de la diffraction pour des ouvertures de forme quelconque, même en des points très proches de l'ouverture, condition pour laquelle la relation classique (approximation de Fresnel) n'est plus valable. Les résultats de ces calculs ont été confirmés par une étude expérimentale effectuée avec l'équipement laser du laboratoire de radiométrie.

La réflectivité résiduelle des récepteurs pièges a aussi été mesurée, de façon à déterminer leur rendement quantique externe. Dans ce cas, ces

pièges peuvent être utilisés comme récepteurs spectralement neutres sur une partie au moins du spectre.

Au fur et à mesure que l'exactitude des étalonnages radiométriques s'améliore, les effets de la réflectivité diffuse deviennent progressivement plus importants. On a donc poursuivi la mesure de la réflectivité diffuse de la surface des récepteurs, en utilisant une petite sphère intégrante pour évaluer différents types de photodiodes.

Un nouveau montage de récepteur piège, appelé piège tunnel, a été mis au point au NIST. L'atelier de mécanique du BIPM en a réalisé une copie dont nous sommes en train d'examiner le comportement radiométrique.

On a étudié une photodiode utilisée au BESSY (Berlin) pour la mesure du rayonnement x mou. Il en résulte que ce type de photodiode peut être auto-étalonné aux longueurs d'onde du spectre visible et que sa sensibilité spectrale absolue peut être mesurée jusqu'à la longueur d'onde de 250 nm par des méthodes radiométriques classiques. Par combinaison avec des mesures faites avec le synchrotron, cette étude montre que la photodiode peut être étalonnée de 1 nm à 1000 nm.

## 6.2 Thermométrie et manométrie

Les mesures thermométriques se sont limitées au contrôle des sondes utilisées dans la section de radiométrie et à l'étalonnage du thermomètre à mercure qui sert de référence dans le manobaromètre.

La remise en état du manobaromètre est terminée. La société OMICRON a nettoyé les chambres de mesure, le manobaromètre auxiliaire et les vannes électromagnétiques. Elle a aussi nettoyé et distillé le mercure. L'optique a été réalignée après nettoyage.

Tout l'équipement auxiliaire du manobaromètre a été complètement renouvelé par le BIPM, en particulier le groupe de pompes à vide, les réservoirs ballasts, les canalisations de raccordement et le système de contrôle des mesures. Après une interruption de quatre mois, les jauges de pression des autres sections du BIPM peuvent à nouveau être étalonnées. Le très bon contraste des franges que l'on observe maintenant est la preuve que le réglage de l'interféromètre utilisé pour localiser les ménisques de mercure a été effectué correctement.

## 6.3 Travaux d'étalonnage

Des lampes étalons d'intensité lumineuse ont été étalonnées pour le VSL (Pays-Bas) et l'INMETRO (Brésil).

## **6.4 Publications, conférences et voyages : section de radiométrie, photométrie, thermométrie et manométrie**

### **6.4.1 Conférences et exposés**

R. Köhler a participé :

— à la conférence « New Developments and Applications in Optical Radiometry IV » à Baltimore (É.-U. d'Amérique) du 5 au 9 octobre 1992. Il a aussi visité le laboratoire de radiométrie du NIST ;

— au Council of Optical Radiation Measurements (CORM 93) à Gaithersburg (É.-U. d'Amérique) du 18 au 21 mai 1993. Sur invitation, il a fait un exposé intitulé « Optical Radiometry at the BIPM ».

### **6.4.2 Voyages (réunions, visites de laboratoires et d'instituts)**

R. Köhler s'est rendu à :

— Grenoble (France), les 11 et 12 février 1993, pour participer à des discussions à l'European Synchrotron Radiation Facility ;

— Delft (Pays-Bas), du 26 au 29 mai 1993, pour porter des récepteurs au VSL (comparaison internationale) et pour visiter les laboratoires de radiométrie et de photométrie. Il a aussi fait un exposé sur la radiométrie au BIPM ;

— Paris (France), le 26 mai 1993, comme membre du jury pour une thèse d'ingénieur au CNAM ;

— Turin (Italie), du 2 au 4 juin 1993, pour porter des récepteurs à l'IEN (comparaison internationale) et pour visiter les laboratoires de radiométrie et de photométrie.

R. Goebel s'est rendu à :

— Grenoble (France), les 11 et 12 février 1993, pour participer à des discussions à l'European Synchrotron Radiation Facility.

## **6.5 Activités en liaison avec des organismes extérieurs**

J. Bonhore participe à titre d'expert de langue française au Comité technique 7.06 « Terminologie de l'éclairage » de la Commission internationale de l'éclairage (CIE).

R. Köhler est entré au comité technique 2.29 « Mesure de la linéarité des récepteurs » de la CIE.

## **6.6 Visiteurs de la section de radiométrie, photométrie, thermométrie et manométrie**

M. Wanchai Chinchusak (DSS, Bangkok, Thaïlande), 7 avril 1993.

M. Y. Hermier (INM, Paris, France), 14 mai 1993.

M. J. Kryl (CMI, Prague, Rép. tchèque), 28 mai 1993.

M. H. W. Reyn (VSL, Delft, Pays-Bas), 7-11 juin 1993.

Mme M. Velloso, (INMETRO, Rio de Janeiro, Brésil), 9-26 juin 1993.

## 7. Rayonnements ionisants (J. W. Müller)

Les récentes réunions des trois sections du CCEMRI et la participation du personnel à des conférences internationales ont été autant d'occasions de situer nos travaux dans un cadre plus large, tant du point de vue des services rendus que des réalisations effectuées. Le résultat est encourageant : dans certains domaines particuliers le BIPM peut même prétendre à une position de tête.

### 7.1 Dosimétrie (M. Boutillon et V. D. Huynh)

#### 7.1.1 Rayons gamma et rayons x (M. Boutillon et A.-M. Perroche)

i) *Changement du facteur d'étalonnage des étalons secondaires, en termes de kerma dans l'air, avec le spectre du faisceau de  $^{60}\text{Co}$*

La mesure du kerma dans l'air peut être effectuée au BIPM dans les faisceaux de deux sources de  $^{60}\text{Co}$ , dont les activités sont, vers la fin de 1993, 0,8 TBq et 90 TBq. La première source est placée dans l'air et la seconde dans une tête de téléthérapie. La contribution du rayonnement diffusé dans les deux faisceaux, en termes de fluence énergétique, est de 8 % et 14 %, respectivement. Les conditions sont excellentes (même étalon, même lieu et même système de mesure) pour évaluer la variation du facteur d'étalonnage d'un instrument secondaire avec la qualité du faisceau de  $^{60}\text{Co}$ .

Six chambres de transfert ont été utilisées (types Shonka et NE 2561). La différence entre les facteurs d'étalonnage mesurés dans les deux faisceaux est de l'ordre de 0,1 % à 0,2 %, suivant la chambre. Cet écart représente plus de deux fois l'incertitude estimée ( $\sigma = 0,05$  %) et met en évidence une faible mais réelle dépendance de la réponse de la chambre avec le faisceau de  $^{60}\text{Co}$  utilisé. Lors des comparaisons internationales d'étalons de kerma dans l'air celle-ci contribue à l'incertitude globale.

ii) *Stabilité de la source de  $^{60}\text{Co}$  (90 TBq)*

La source de 90 TBq a été d'abord utilisée pour des mesures de dose absorbée dans l'eau  $D_w$  et, comme il a été mentionné dans le Rapport du directeur de 1991, une faible mais réelle décroissance, de 0,1 % pendant deux ans, a été observée. Pour éviter un effet possible de l'humidité sur le fourreau en plexiglas de l'étalon, une nouvelle enveloppe en polythène est maintenant utilisée. La correction due à la présence de cette nouvelle enveloppe a été expérimentalement déterminée et un grand nombre de mesures de  $D_w$ , effectuées avec chacune des enveloppes, montrent une différence de 0,02 %. Une vérification expérimentale a également été faite pour s'assurer que la transmission de la face avant du fantôme, en plexiglas, n'est pas affectée par l'irradiation à laquelle celle-ci est soumise.

La source est aussi utilisée pour des mesures de dose absorbée dans le graphite et les résultats obtenus durant ces deux dernières années montrent

une décroissance dans le graphite semblable à celle observée dans l'eau. Cela indique que cet effet est dû soit à la source elle-même, qui peut contenir des impuretés, soit au système de mesure. Des contrôles seront faits ultérieurement.

iii) *Vérification du code de l'AIEA pour la détermination de la dose absorbée dans l'eau*

La valeur de  $D_w$  était obtenue jusqu'à présent par calcul à partir des mesures effectuées dans l'air. Plusieurs codes de calcul ont été proposés dans ce but et sont utilisés mondialement. Un certain nombre de laboratoires primaires et le BIPM ont maintenant mis au point des méthodes fondamentales de mesure de la dose absorbée dans l'eau, permettant de vérifier ces divers codes. Celui de l'AIEA, étant le plus largement répandu, a été choisi pour le présent travail.

On a utilisé pour ce faire les facteurs d'étalonnage de dix-huit chambres de transfert de différents types, obtenus dans l'air et dans l'eau dans les conditions de référence. Les résultats sont cohérents avec l'incertitude estimée par l'AIEA qui est de l'ordre de 1 % ou moins. On peut noter que :

— Pour un type donné de chambres, la valeur expérimentale du facteur  $C_\lambda^K$ , c'est-à-dire le rapport des facteurs d'étalonnage dans l'eau et dans l'air, peut varier jusqu'à 0,7 %. Cette dispersion non négligeable est due à des différences dans la construction des chambres, qui ne sont pas prises en compte par le code de calcul.

— Les résultats sont meilleurs pour les chambres ayant une fine électrode que pour celles munies d'une électrode large. Ceci semble indiquer que la correction pour la présence de la cavité est estimée de façon trop simple par le code. La variation de  $C_\lambda^K$  avec la profondeur dans l'eau, mesurée avec dix chambres différentes, confirme cette conclusion.

D'autres laboratoires, la PTB et le BEV, ont effectué des tests similaires et ont obtenu des résultats comparables. Une analyse détaillée de leurs résultats comparés à ceux du BIPM doit être faite.

iv) *Comparaisons et étalonnages au BIPM*

L'UDZ et le BIPM ont effectué une comparaison d'étalons de kerma dans l'air dans le rayonnement du  $^{60}\text{Co}$ . L'étalon de l'UDZ est une chambre à cavité en graphite construite à l'OMH. Les facteurs de correction applicables à cet étalon ont été déterminés à l'UDZ. Le résultat est  $K_{\text{UDZ}}/K_{\text{BIPM}} = 0,9992 \pm 0,0023$ .

Deux chambres d'ionisation de l'UDZ ont aussi été étalonnées en termes de kerma dans l'air dans le rayonnement du  $^{60}\text{Co}$ . Les facteurs d'étalonnage sont plus élevés que ceux déterminés à l'UDZ de 0,16 % et 0,07 %. Ces écarts sont compatibles avec la différence observée entre les étalons. L'une de ces chambres a également été étalonnée en termes de dose absorbée dans l'eau.

Deux chambres d'ionisation utilisées au STUK comme étalons secondaires ont été étalonnées en termes de kerma dans l'air dans le domaine des rayons x de faible énergie. L'une d'elles avait déjà été étalonnée en 1985 et la variation de son facteur d'étalonnage est inférieure à 0,3 %.

Les étalons secondaires du STUK, du SRPI et du LNMRI ont été étalonnés, dans le domaine des rayons x de moyenne énergie, en termes de kerma dans l'air et, dans le rayonnement du  $^{60}\text{Co}$ , en termes de kerma dans l'air et de dose absorbée dans l'eau.

Trois chambres d'ionisation du BIPM, à paroi équivalente au tissu, utilisées dans une comparaison internationale de dosimétrie neutronique, ont été ré-étalonnées dans le rayonnement du  $^{60}\text{Co}$ . Leurs facteurs d'étalonnage continuent d'évoluer : ils ont augmenté de 1 % au cours des dix dernières années.

La collaboration active avec l'AIEA s'est poursuivie. L'AIEA a développé un système de dosimétrie pour le réseau des SSDL, qui comprend maintenant soixante-douze laboratoires à travers le monde, en organisant des comparaisons de dose absorbée dans l'eau au moyen de dosimètres thermoluminescents. Trois lots de trois dosimètres ont été irradiés (2 Gy) pour l'AIEA dans le fantôme d'eau du BIPM en novembre 1992 et mars 1993. Les résultats de ces irradiations,  $D_{\text{AIEA}}/D_{\text{BIPM}} = (1,001 \text{ à } 1,003) \pm 0,006$ , sont satisfaisants.

#### v) *Source de $^{137}\text{Cs}$*

L'installation de la source de  $^{137}\text{Cs}$  est en cours. La source (environ 1 TBq) sera placée dans un conteneur (irradiateur) construit spécialement par la Société atlantique de techniques avancées, Nantes, France. Pour la mesure du kerma dans l'air le faisceau défini par le collimateur aura un diamètre de 10 cm à 1 m de la source. Pour la mesure de l'équivalent de dose ambiant, un collimateur plus large définira un faisceau de 65 cm de diamètre à 3 m. Un châssis métallique, construit au BIPM, supportera le conteneur de la source et les tables de translation sur lesquelles les chambres d'ionisation seront placées.

### **7.1.2 Mesures neutroniques (V. D. Huynh)**

#### i) *Comparaison internationale de mesures de fluence de neutrons*

Une comparaison internationale de mesures de fluence de neutrons à 24,5 keV, organisée par le BIPM sous les auspices de la Section III (Mesures neutroniques) du CCEMRI, est en cours. Les dates de mesures pour les six laboratoires participants (ETL, IAE, NIST, NPL, PTB et VNIIM) ont été fixées et il est prévu que les mesures seront achevées au milieu de l'année 1995. Les instruments de transfert, qui comportent trois sphères de Bonner, de diamètre 63,5 mm, 88,9 mm et 241,3 mm, seront

renvoyés au BIPM pour en vérifier la stabilité chaque fois qu'un laboratoire participant aura terminé ses mesures. Le BIPM utilisera un dispositif de contrôle spécialement conçu et construit à cet effet.

### ii) *Spectrométrie neutronique*

La fonction de réponse et l'efficacité de détection du scintillateur liquide NE-213 du BIPM ont été calculées, pour des neutrons de 2,50 MeV et 14,65 MeV, en utilisant les programmes de Monte Carlo fournis par la PTB. Les résultats font apparaître un bon accord des efficacités calculées avec celles que l'on déduit des mesures effectuées en 1991, en utilisant les coïncidences entre les neutrons provenant du scintillateur et les particules associées du détecteur au silicium (voir Rapport du directeur 1991). En ce qui concerne les fonctions de réponse, l'accord est assez bon entre les spectres calculé et mesuré pour les neutrons de 2,50 MeV; pour les neutrons de 14,65 MeV, des différences apparaissent dans la région des hautes énergies des spectres. Cette divergence est due à des effets de saturation dans les spectres expérimentaux en amplitude.

### iii) *Mesures du taux d'émission des neutrons*

À la demande du LNMRI, une source neutronique de Am-Be provenant de ce laboratoire sera étalonnée au BIPM en utilisant la méthode du bain de manganèse. Dans ce but, un nouveau détecteur NaI(Tl) a été étudié, de même qu'un système électronique entièrement nouveau faisant appel à un ordinateur pour traiter les résultats. Les mesures d'activité d'une solution de sulfate de manganèse irradiée à l'aide de nos sources étalons Ra-Be et Am-Be ont permis de voir que l'ensemble du système fonctionne de façon satisfaisante. Une augmentation de 4,7 % de l'efficacité de détection du nouveau système, par rapport à l'ancien, a été constatée pour les deux sources.

## 7.2 Radionucléides (J. W. Müller)

### 7.2.1 Mesures d'activité (G. Ratel)

#### i) *Comparaison internationale de mesures d'activité de <sup>75</sup>Se*

Tous les résultats concernant la comparaison internationale de mesures d'activité spécifique du <sup>75</sup>Se ont été communiqués au BIPM à la fin de décembre 1992. Un projet de rapport résumant les données communiquées par les participants a été préparé et a servi de base aux discussions de la réunion de la Section II du CCEMRI qui s'est tenue en juin 1993. Il a été suggéré que les laboratoires y apportent toutes les modifications souhaitables qui seront incorporées dans la version finale.

La comparaison peut être résumée de la manière suivante. Les résultats des vingt et un laboratoires participants sont représentés sur la figure 7.1. Quatre méthodes ont été utilisées pour déterminer l'activité de la solution qui avait été préparée par le BIPM : la méthode traditionnelle de coïncidences  $4\pi\beta\text{-}\gamma$  a été adoptée par la plupart des laboratoires (dix-huit), alors qu'un laboratoire a fait usage de la méthode de comptage par anti-coïncidences. Parallèlement, deux laboratoires ont fait des mesures au moyen du comptage  $4\pi\gamma$  à haute efficacité, alors que deux autres ont employé une chambre d'ionisation.

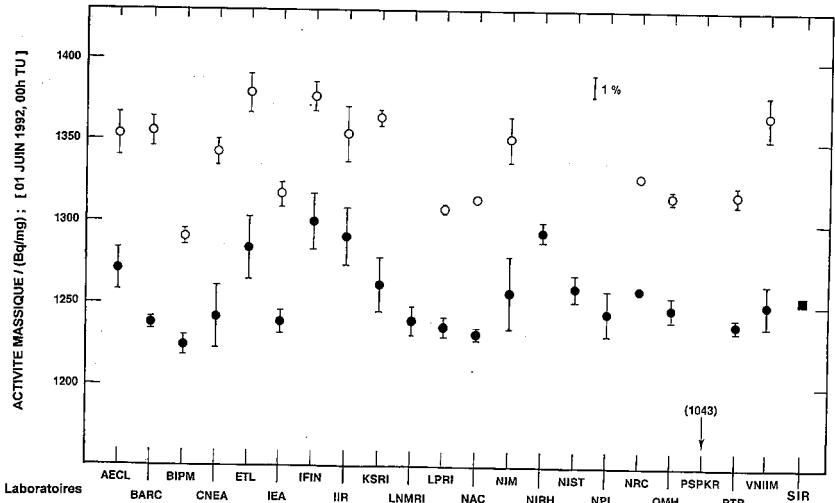


Fig. 7.1. — Résultats de la comparaison internationale de  $^{75}\text{Se}$  obtenus avant ○ et après ● correction pour la présence des événements retardés. La valeur obtenue par l'intermédiaire des mesures du SIR est également indiquée.

Pour tenir compte des événements apparaissant dans le canal bêta, la plupart des participants ont utilisé un compteur proportionnel à circulation de gaz. L'efficacité maximale dépend beaucoup du type de compteur employé et peut atteindre 0,75 pour un compteur proportionnel à pression sous 1,1 MPa. Les deux laboratoires utilisant le comptage par scintillation liquide ont obtenu des efficacités de 0,50 et 0,73.

La présence d'un état métastable à 304 keV dans le schéma de désintégration du  $^{75}\text{Se}$  oblige, lors de l'usage des méthodes de coïncidences et d'anti-coïncidences, à corriger les résultats pour tenir compte des événements retardés qui sont détectés dans le canal électronique en même temps que les événements prompts. Malheureusement, cette correction n'est pas très bien connue et dépend fortement de la manière dont elle a été dérivée. Des mesures expérimentales directes ont fourni des valeurs allant de 5,4 % à 6,5 %, alors que par des méthodes d'évaluation s'appuyant sur les tables de données nucléaires, des corrections s'étendant de 4,9 % à 9,0 % sont obtenues. Les différences s'expliquent essentiellement par les



domaines d'énergie choisis dans la voie gamma. La figure 7.2 indique les valeurs utilisées par les différents laboratoires.

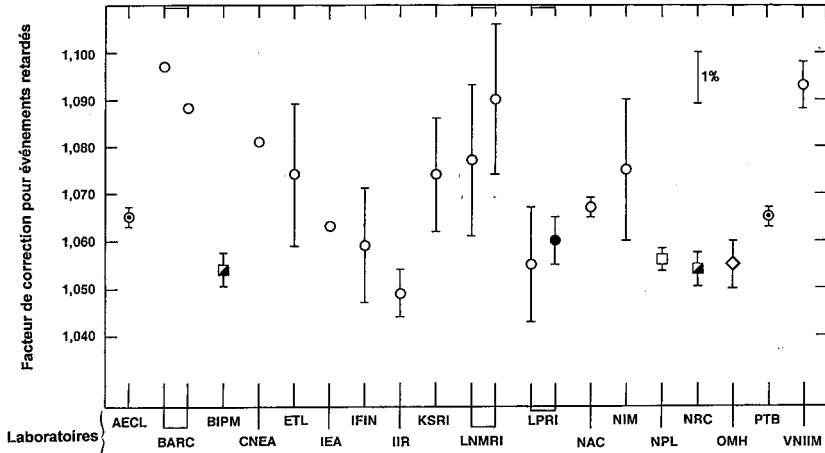


Fig. 7.2. — Facteurs de correction pour les événements retardés utilisés par les différents laboratoires. Les symboles indiquent la méthode de détermination : □, ■ NPL, comptage par la méthode de corrélation ; ○ PTB, comptage par la méthode de corrélation ; ● LPRI, méthode du double temps-mort ; ◇ OMH, méthode d'extrapolation. Les valeurs ○ ont été obtenues à partir des tables de données nucléaires.

Les résultats définitifs, présentés sur la figure 7.1 (à l'exception de celui du PSPKR), ont une dispersion totale de 6 %. Ceci n'est pas dû à la préparation des ampoules au BIPM, comme on peut le voir sur la figure 7.3 qui montre le courant d'ionisation, mesuré dans la chambre d'ionisation du SIR, pour toutes les ampoules distribuées aux laboratoires, comparé à l'activité spécifique obtenue par les participants.

Les données semblent former deux groupes non reliés aux méthodes utilisées. Les incertitudes indiquées par quelques laboratoires semblent optimistes. La valeur moyenne de toutes les mesures effectuées dans le cadre du SIR est également indiquée sur la figure 7.1 et montre un bon accord avec les valeurs inférieures.

## ii) Recherche concernant la transition retardée du $^{75}\text{Se}$

Parallèlement à la comparaison internationale décrite précédemment, une nouvelle approche pour tenir compte des événements retardés a été explorée au BIPM. On a utilisé le fait que les transitions retardées apparaissent à des endroits bien définis dans le spectre électronique. En changeant avec soin la position des fenêtres définissant la hauteur des impulsions des événements acceptés, il a été possible de séparer ces événements des autres et de déterminer leur influence de manière numérique [13].

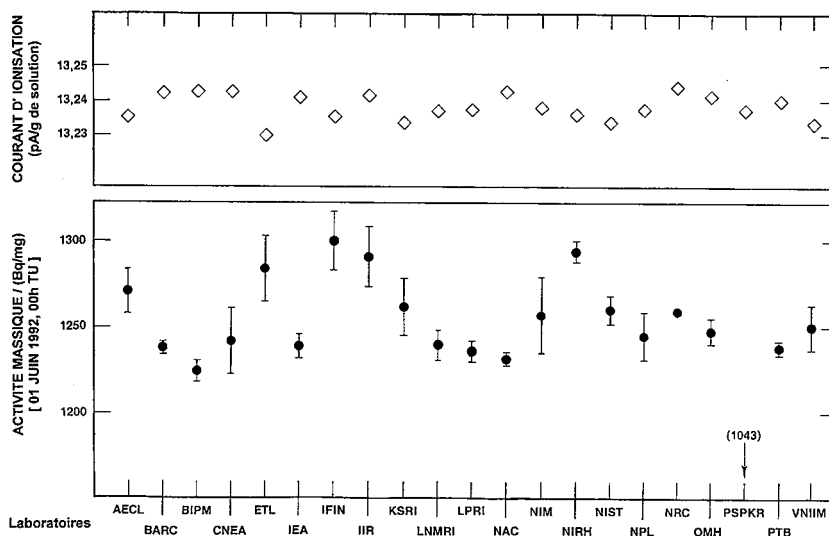


Fig. 7.3. — Comparaison des résultats pour l'activité massique mesurée par les laboratoires participants, après correction pour les événements retardés, avec le courant spécifique des ampoules de solutions préparées au BIPM, obtenu dans la chambre d'ionisation du SIR.

### iii) *Système international de référence pour la mesure de l'activité des radionucléides émetteurs de rayonnement gamma (SIR)*

Depuis octobre 1992, huit laboratoires (AECL, IRA, LPRI, NAC, OMH, PSPKR, PTB, VNIIM) ont soumis seize ampoules, remplies de huit radionucléides en solution, à savoir :  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{75}\text{Se}$ ,  $^{88}\text{Y}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ , permettant d'obtenir treize nouveaux résultats. Cela conduit à un total de 589 ampoules mesurées et à 432 résultats indépendants enregistrés dans les tables du SIR depuis son origine.

## 7.2.2 Statistiques de comptage (J. W. Müller)

Deux sujets ont été choisis pour illustrer les travaux effectués récemment ; les autres travaux font l'objet de rapports et de publications.

### i) *Statistique d'un processus de Poisson après division*

Lorsque l'on compte un grand nombre d'impulsions, les chiffres les moins significatifs peuvent être omis en enregistrant seulement les événements observés après un diviseur qui effectue une division par  $d$ . Nous nous intéressons au comportement statistique du nombre  $m$ , obtenu à la sortie, pour des impulsions qui, à l'entrée, suivent un processus de Poisson de valeur moyenne  $\mu = \rho t$ .

Il est commode de caractériser la sortie  $m$  par sa valeur moyenne  $\bar{m}$  et sa variance  $s^2$  pour une seule mesure. Les expressions théoriques appropriées ont été établies il y a longtemps\*, mais, comme la plupart sont très compliquées, il semble qu'elles n'ont jamais été utilisées. Nous avons pensé que cela valait la peine de les contrôler expérimentalement.

Deux cas doivent être distingués. Dans l'un les impulsions « résiduelles » contenues dans le module diviseur, c'est-à-dire le « reste » de la division (dont la valeur est comprise entre 0 et  $d - 1$ ), sont conservées ; dans l'autre le compteur est remis à zéro après chaque enregistrement.

L'expression pour la variance mesurée de  $m$ , par exemple pour le cas d'une remise à zéro, peut être mise sous la forme

$$s_0^2(\eta) = \frac{\mu}{d^2} + \frac{d^2 - 1}{12 d^2} + R_0(\eta), \quad \text{avec } \eta = \mu/d,$$

où  $R_0(\eta)$  est donné par une des formules de Freycenon. La figure 7.4 montre que la comparaison avec nos mesures est excellente. Cela est également vrai pour les autres conditions expérimentales choisies (c'est-à-dire avec ou sans remise à zéro, pour différents diviseurs et différents taux de comptage). On a également constaté un parfait accord entre les valeurs moyennes théorique et expérimentale.

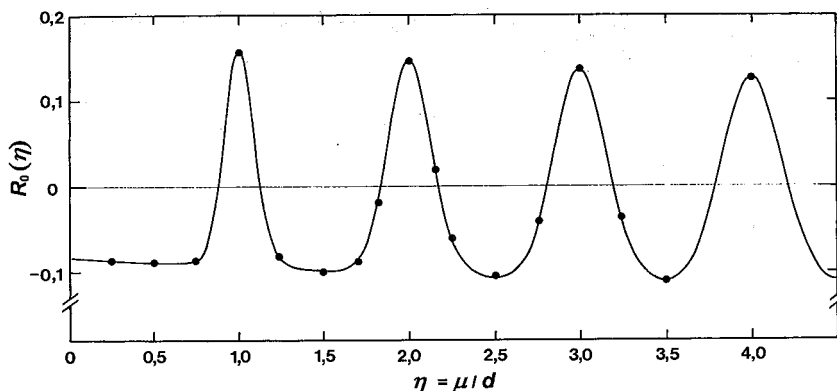


Fig. 7.4. — Comparaison des mesures avec la courbe théorique pour la partie oscillante  $R_0(\eta)$  de la variance de  $m$  (pour  $d = 100$  et remise à zéro).

### ii) Correction immédiate de temps morts

Il nous a été demandé de donner notre avis sur un nouveau dispositif de correction dans lequel les pertes dues aux temps morts sont automatiquement compensées en remplaçant les impulsions perdues par

\* J. FREYCENON, *Rapports CEA-R 2635 (1964) et CEA-R 2907 (1966)*.

d'autres qui sont insérées artificiellement de telle sorte que le comptage enregistré ne semble pas être affecté par les temps morts. L'étude d'un projet de rapport sur le principe de base s'est avérée difficile, car la description dont on dispose manque de précision.

Supposons que la série de comptage observée soit connue par ses temps d'arrivée enregistrés  $T_k$  (qui ont pu être stockés en mémoire), où

$$T_k = k\tau + \sum_{j=1}^k \delta_j, \quad \text{pour } k \geq 1,$$

pour un temps mort inséré  $\tau$  du type non-étendu. Si le temps mort est éliminé, cela conduit à la séquence

$$t_k = T_k - k\tau = \sum_{j=1}^k \delta_j,$$

dont on peut montrer qu'elle correspond à un processus de Poisson avec le taux de comptage originel  $\rho$ . À l'évidence, toutes les pertes (inconnues) surviennent pendant les temps morts, mais elles peuvent être simulées au moyen de la série reconstruite ci-dessus. En constituant, pour chaque temps d'arrivée  $T_k$ , une série de ce type à partir des intervalles qui précèdent, on peut estimer le nombre de pertes  $K$  survenues pendant  $\tau$ . Ce nombre est donné par les inégalités

$$\sum_{j=0}^K \delta_{k-j} < \tau \quad \text{et} \quad \sum_{j=0}^{K+1} \delta_{k-j} > \tau,$$

que l'on peut aisément résoudre numériquement, pour un temps d'arrivée donné  $T_k$ .

Cette approche, également connue sous le nom de méthode de Galushka, lorsqu'elle est correctement mise en œuvre du point de vue électronique, peut s'avérer utile et commode pour de nombreuses utilisations, mais il n'y a aucune raison pour la préférer aux approches plus courantes utilisées dans les applications métrologiques car les corrections ultérieures risquent d'être fortement corrélées.

### 7.3 Publications, conférences et voyages : section des rayonnements ionisants

#### 7.3.1 Publications extérieures

1. BOUTILLON M., PERROCHE A.-M., Ionometric determination of absorbed dose to water for cobalt-60 gamma rays, *Phys. Med. Biol.*, 1993, **38**, 439-454.

2. BOUTILLON M., PERROCHE A.-M., Comparisons and calibrations at the Bureau International des Poids et Mesures in the field of X and  $\gamma$  rays, *International symposium on measurement assurance in dosimetry*, 1993, IAEA-SM-330/22.
3. BOUTILLON M., COURSEY B. M., HOHLFELD K., OWEN B., ROGERS D. W. O., Comparison of primary water absorbed dose standards, *International symposium on measurement assurance in dosimetry*, 1993, IAEA-SM-330/48.
4. SHORTT K. R., ROSS C. K., SCHNEIDER M., HOHLFELD K., ROOS M., PERROCHE A.-M., A comparison of absorbed dose standards for high energy x-rays, *Phys. Med. Biol.*, 1993, **38**, 1937-1955.

### 7.3.2 Rapports BIPM

5. BOUTILLON M., Experimental determination of  $C_A^A$  in a  $^{60}\text{Co}$  beam, *Document CCEMRI(I)/93-6*, avril 1993, 5 pages.
6. HUYNH V. D., LAFAYE L., BIPM participation in an international comparison of neutron fluence measurements using two Bonner spheres as transfer instruments, *Rapport BIPM-92/6*, octobre 1992, 13 pages.
7. MÜLLER J. W., Alternate moments and parity moments, *Rapport BIPM-92/5*, octobre 1992, 6 pages.
8. MÜLLER J. W., Shifted developments of power functions, *Rapport BIPM-92/9*, novembre 1992, 12 pages.
9. MÜLLER J. W., Some remarks on the Galushka method, *Rapport BIPM-93/2*, février 1993, 7 pages.
10. MÜLLER J. W., Pooled variances, *BIPM Working Party Note 236*, avril 1993, 5 pages.
11. PERROCHE A.-M., BOUTILLON M., KOVAR I., WAGNER R., Comparison of the air kerma standards of the UDZ and the BIPM for  $^{60}\text{Co}$  radiation, *Rapport BIPM-93/1*, janvier 1993, 6 pages.
12. PERROCHE A.-M., Comparisons and calibrations at the BIPM (1991-1993), *Document CCEMRI(I)/93-5*, avril 1993, 9 pages.
13. RATEL G., Activity measurements of a  $^{75}\text{Se}$  solution in the frame of an international comparison (June 1992), Preliminary report, *Document CCEMRI(II)/93-14*, juin 1993, 21 pages.

### 7.3.3 Voyages (réunions, visites de laboratoires et d'instituts)

J. W. Müller s'est rendu :

— à Vienne (Autriche), du 12 au 17 octobre 1992, pour participer à la réunion annuelle de la Main Commission de l'ICRU comme représentant du BIPM. À cette occasion, il a reçu la cinquième médaille JARI en

reconnaissance de son importante contribution aux mesures de radioactivité, sa profonde compréhension des statistiques de comptage et son approche originale du traitement des incertitudes. Cette récompense lui a été remise par M. H. Seligman, rédacteur en chef de l'*International Journal of Radiation Applications and Instrumentation, Part A, Applied Radiation and Isotopes*;

— à Munich (Allemagne), du 19 au 23 octobre 1992, pour participer à une réunion du Committee on Quantities and Units de l'ICRU;

— à l'AIEA, Vienne (Autriche), du 23 au 27 novembre 1992, en tant que membre du comité scientifique des SSDL;

— au LGAI, Bellaterra (Espagne), du 9 au 11 décembre 1992, pour participer à un atelier et à un séminaire sur les incertitudes de mesures dans les essais, les évaluations et les applications. Il a fait une conférence intitulée « A unified approach to the expression of uncertainty in measurements »;

— à l'IMGC, Turin (Italie), du 9 au 12 mars 1993, pour participer à la quatrième réunion d'EUROMET sur la masse, où il a fait une conférence intitulée « Presentation of the new Guide to the expression of uncertainty in measurement »;

— au NPL, Teddington (Royaume-Uni), du 7 au 11 juin 1993, où il a assisté à l'International Symposium on Radionuclide Metrology;

— à l'AIEA, Vienne (Autriche), du 28 juin au 2 juillet 1993, comme conseiller pour le projet final du rapport technique de l'AIEA, Technical Report TRS-185;

— à Tampere (Finlande), du 26 au 30 juillet 1993, pour participer à la réunion annuelle de la Main Commission de l'ICRU comme représentant du BIPM.

M. Boutillon a pris part à la réunion annuelle de la Main Commission de l'ICRU qui s'est tenue à Vienne (Autriche), du 12 au 17 octobre 1992.

M. Boutillon et A.-M. Perroche ont assisté à l'International Symposium on Measurement Assurance in Dosimetry, à Vienne (Autriche), du 24 au 27 mai 1993. M. Boutillon a fait une conférence intitulée « Comparisons and calibrations at the Bureau International des Poids et Mesures in the field of x and  $\gamma$  rays ».

G. Ratel a assisté à l'International Symposium on Radionuclide Metrology, NPL, Teddington, du 7 au 11 juin 1993, où il a fait une présentation sur panneaux intitulée « Measurement of the activity concentration of a solution of  $^{75}\text{Se}$  »; on lui a demandé aussi de présenter les résultats de la comparaison internationale de  $^{75}\text{Se}$ .

#### 7.4 Activités en liaison avec des organismes extérieurs

J. W. Müller est membre du comité de rédaction de *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. Il représente le BIPM à l'ICRU et il préside le Report Committee sur « Particle Counting in Radioactivity Measurements » de l'ICRU. Il est aussi membre du comité scientifique

des SSDL chargé de conseiller l'AIEA, membre du comité scientifique « Mesures Physiques et Métrologie » de l'INM (Paris), et membre du groupe de travail ISO/TAG-4 sur l'expression des incertitudes.

## 7.5 Visiteurs de la section des rayonnements ionisants

### 7.5.1 Stagiaires

Mme A.-M. Perroche (SCPRI, Le Vésinet, France) a poursuivi sa participation aux travaux de la section des rayonnements ionisants (dosimétrie) comme elle le fait depuis 1961.

MM. A. Kosunen et H. Lindroos (STUK, Helsinki, Finlande) ont séjourné au BIPM du 23 au 27 novembre 1992 pour étalonner des chambres d'ionisation dans le domaine des rayons x de faibles et moyennes énergies et dans le rayonnement gamma du  $^{60}\text{Co}$ .

M. E. R. Cecatti (LNMRI, Rio de Janeiro, Brésil) a séjourné au BIPM du 28 juin au 16 juillet 1993 pour étalonner les chambres d'ionisation de son laboratoire.

### 7.5.2 Visiteurs

M. S. M. Seltzer (NIST, Gaithersburg, É.-U. d'Amérique), 12 octobre 1992.

M. H. Imai (ETL, Tsukuba, Japon), 29 octobre 1992.

M. A. Etchehebere et Mme L. Contier de Freitas (LNMRI, Rio de Janeiro, Brésil), du 2 au 4 novembre 1992.

Un groupe de visiteurs de l'ONERA (Châtillon, France), 26 novembre 1992.

M. L. E. Grigorescu (IFIN, Bucarest, Roumanie), 9 février 1993.

M. K. Sakihara (ETL, Tsukuba, Japon), 1<sup>er</sup> mars 1993.

MM. P. Blanchis et J.-L. Picolo (LPRI, Saclay, France), 2 mars 1993.

M. X. D. Phan (LNE, Paris, France), 28 avril 1993.

M. E. S. da Fonseca (LNMRI, Rio de Janeiro, Brésil), 22 et 23 mars 1993.

M. H. Klein (PTB, Braunschweig, Allemagne), 21 avril 1993.

M. K. Kudo (ETL, Tsukuba, Japon), 22 avril 1993.

M. D. F. G. Reher (IMMR, Geel, Belgique), 3 juin 1993.

M. Sun-Tae Hwang (KRISS, Taejon, Corée), 4 juin 1993.

#### IV. — PUBLICATIONS DU BIPM

##### 1. Publications générales

Depuis juillet 1992 ont été publiés :

*Procès-verbaux des séances du Comité international des poids et mesures*, Tome 60, 81<sup>e</sup> session, septembre 1992.

*Comité consultatif d'électricité*, 19<sup>e</sup> session, 1993.

*Rapport annuel de la section du temps du BIPM (1992)*, Vol. 5, 1993, 150 pages.

Circulaire T (mensuelle), 4 pages.

##### 2. Metrologia (D. A. Blackburn)

Le volume 29 de *Metrologia* est sorti en 1992 et au début de 1993. Il comporte 39 articles, dont 30 articles originaux et 9 faisant le point sur un sujet précis. En plus des quatre numéros habituels, ce volume comprend aussi deux numéros spéciaux, l'un sur les mesures électromagnétiques, l'autre étant un index des mesures et de la théorie se rapportant à la gravité non newtonienne et aux nouvelles forces faibles. Dans le volume 30 les deux numéros spéciaux seront consacrés à des comptes rendus de conférences. L'un se rapportera à la réunion sur *New Developments and Advances in Absolute Radiometry* qui s'est tenue à Baltimore (É.-U. d'Amérique) en octobre 1992, et l'autre au second séminaire international du CCM sur la métrologie des pressions entre 1 kPa et 1 GPa, qui s'est tenu à Paris en juin 1993.

Entre le 1<sup>er</sup> janvier et le 31 décembre 1992, 41 articles originaux ont été soumis pour publication ; sur ce nombre, 27 ont été publiés, 3 vont l'être, 10 ont été refusés et 1 est encore en cours d'examen. Entre le 1<sup>er</sup> janvier et le 31 mai 1993, 19 articles ont été soumis pour publication ; au 31 mai 1993, 2 sont parus, 9 ont été acceptés pour publication, 3 ont été refusés et 5 sont encore en cours d'examen.

Les problèmes d'édition se sont améliorés au cours de l'année 1992. L'amélioration du service obtenue sur l'année écoulée devrait permettre à *Metrologia* de retrouver en 1994 le rythme prévu pour sa parution.



## V. — RÉUNIONS ET EXPOSÉS AU BIPM

### 1. Réunions

Groupe de travail sur le TAI, du 22 au 23 mars 1993.

CCDS, du 24 au 26 mars 1993.

CCM, du 9 au 11 juin 1993.

CCT, du 7 au 9 septembre 1993.

### 2. Exposés

Les exposés suivants ont été présentés au BIPM dans le cadre général de l'information du personnel :

G. Th. Guilbaud (EHSS, Paris) : La mathématique de l'à-peu-près, 16 décembre 1992.

P. Connes (Service d'aéronomie du CNRS, Verrières-le-Buisson) : Accélérométrie astronomique absolue, 13 janvier 1993.

A. R. Colclough (NPL, Royaume-Uni) : The work of the NPL Division of Mechanical and Optical Metrology, 21 janvier 1993.

P. Juncar (INM, Paris) : Spectroscopie sans effet Doppler sur jet, 10 février 1993.

G. Petit : Pulsars et échelles de temps, 3 mars 1993.

A. Maréchal (membre de l'Académie des sciences, Paris) : Le grand télescope européen (VLT), 27 avril 1993.

D. Reymann : Comparaisons internationales de réseaux de jonctions de Josephson, 12 mai 1993.

R. Köhler : La radiométrie au BIPM, 16 juin 1993.

## VI. — CERTIFICATS ET NOTES D'ÉTUDE

Du 1<sup>er</sup> octobre 1992 au 30 septembre 1993, 72 certificats et 2 notes d'étude ont été délivrés.

### CERTIFICATS

1992

N<sup>os</sup>

- |   |  |
|---|--|
| 24. Chambre d'ionisation,<br>NE 2571-1848 . . . . .   | Ústav Dozimetrie Zárení, Prague,<br>Tchéco-Slovaquie.            |
| 25. Chambre d'ionisation, Victoreen<br>V415-171 . . . . .                                   | Id.  |
| 26. Règle de 1 mètre en acier au nickel,<br>N <sup>o</sup> 14588 . . . . .                  | Société genevoise d'instruments de<br>physique, Genève, Suisse.  |
| 27. Étalon de résistance de 10 000 $\Omega$ ,<br>N <sup>o</sup> J20 606 91 30104 . . . . .  | Danish Institute for Fundamental<br>Metrology, Lyngby, Danemark. |
| 28. Étalon de résistance de 1 $\Omega$ ,<br>N <sup>o</sup> 1894050 (addition) . . . . .     | Centro Español de Metrologia,<br>Madrid, Espagne.                |
| 29. Étalon de résistance de 1 $\Omega$ ,<br>N <sup>o</sup> 1894056 (addition) . . . . .     | Id.  |
| 30. Étalon de résistance de 10 000 $\Omega$ ,<br>N <sup>o</sup> 224109 (addition) . . . . . | Id.  |

1993

- |  |   |
|--|---|
| 1. Chambre d'ionisation, NE 2561-097 . . . . .   | Säteilyturvakeskus, Helsinki, Finlande.                       |
| 2. Chambres d'ionisation, NE 2536/3,<br>R17787 et 620 . . . . .                                    | Id.   |
| 3. Laser à hélium-néon de longueur d'onde<br>633 nm, N <sup>o</sup> IPQ2 (106) - SEXTANT . . . . . | Instituto Português da Qualidade,<br>Lisbonne, Portugal.      |
| 4. Laser à hélium-néon de longueur d'onde<br>633 nm, TESA N <sup>o</sup> SR(L) 005 . . . . .       | Id.   |
| 5. Étalon de force électromotrice à diode<br>de Zener, N <sup>o</sup> 3795009 (addition) . . . . . | Inspection générale de la métrologie,<br>Bruxelles, Belgique. |
| 6. Prototype de masse N <sup>o</sup> 2 (addition) . . . . .  | Roumanie.   |
| 7. Prototype de masse N <sup>o</sup> 5 (addition) . . . . .  | Italie.   |
| 8. Prototype de masse N <sup>o</sup> 6 (addition) . . . . .  | Japon.  |
| 9. Prototype de masse N <sup>o</sup> 12 (addition) . . . . .                                       | Fédération de Russie.   |
| 10. Prototype de masse N <sup>o</sup> 16 (addition) . . . . .                                      | Hongrie.  |
| 11. Prototype de masse N <sup>o</sup> 18 (addition) . . . . .                                      | Royaume-Uni.  |
| 12. Prototype de masse N <sup>o</sup> 20 (addition) . . . . .                                      | États-Unis d'Amérique.  |
| 13. Prototype de masse N <sup>o</sup> 21 (addition) . . . . .                                      | Mexique.  |

- |   |  |
|---|--|
| 14. Prototype de masse N° 23 (addition) . . . .   | Finlande.  |
| 15. Prototype de masse N° 24 (addition) . . . .   | Espagne.   |
| 16. Prototype de masse N° 34 (addition) . . . .   | Académie des sciences de Paris.  |
| 17. Prototype de masse N° 35 (addition) . . . .   | France.  |
| 18. Prototype de masse N° 36 (addition) . . . .   | Norvège.   |
| 19. Prototype de masse N° 37 (addition) . . . .   | Belgique.  |
| 20. Prototype de masse N° 38 (addition) . . . .   | Suisse.  |
| 21. Prototype de masse N° 39 (addition) . . . .   | République de Corée.   |
| 22. Prototype de masse N° 40 (addition) . . . .   | Suède.   |
| 23. Prototype de masse N° 44 (addition) . . . .   | Australie.   |
| 24. Prototype de masse N° 46 (addition) . . . .   | Indonésie.   |
| 25. Prototype de masse N° 48 (addition) . . . .   | Danemark.  |
| 26. Prototype de masse N° 49 (addition) . . . .   | Autriche.  |
| 27. Prototype de masse N° 50 (addition) . . . .   | Canada.  |
| 28. Prototype de masse N° 51 (addition) . . . .   | Pologne.   |
| 29. Prototype de masse N° 53 (addition) . . . .   | Pays-Bas.  |
| 30. Prototype de masse N° 54 (addition) . . . .   | Turquie.   |
| 31. Prototype de masse N° 55 (addition) . . . .   | République fédérale d'Allemagne.   |
| 32. Prototype de masse N° 56 (addition) . . . .   | Afrique du Sud.  |
| 33. Prototype de masse N° 57 (addition) . . . .   | Inde.  |
| 34. Prototype de masse N° 58 (addition) . . . .   | République arabe d'Égypte.   |
| 35. Prototype de masse N° 60 (addition) . . . .   | République populaire de Chine.   |
| 36. Prototype de masse N° 65 (addition) . . . .   | République slovaque.   |
| 37. Prototype de masse N° 66 (addition) . . . .   | Brésil.  |
| 38. Prototype de masse N° 68 (addition) . . . .   | République pop. dém. de Corée.   |
| 39. Prototype de masse N° 69 (addition) . . . .   | Portugal.  |
| 40. Prototype de masse N° 70 (addition) . . . .   | République fédérale d'Allemagne.   |
| 41. Prototype de masse N° 71 . . . . .  | Israël.  |
| 42. Prototype de masse N° 72 . . . . .  | République de Corée.   |
| 43. Prototype de masse N° 74 . . . . .  | Canada.  |
| 44. Prototype de masse N° 75 . . . . .  | Hong Kong Government Standards and<br>Calibration Laboratory, Hong Kong.                             |
| 45. Prototype de masse N° 3 (addition) . . . . .  | Espagne.   |
| 46. Prototype de masse N° 64 (addition) . . . . .                                       | République populaire de Chine.   |
| 47. Prototype de masse N° 62 (addition) . . . . .                                       | Istituto di Metrologia<br>G. Colonnetti, Turin, Italie.  |
| 48. Étalon de résistance de 1 $\Omega$ ,<br>N° 64174 . . . . .                          | Inspection générale de la métrologie,<br>Bruxelles, Belgique.  |
| 49. Étalon de résistance de 1 $\Omega$ ,<br>N° 1711458 . . . . .                        | Instituto Nacional de Metrologia,<br>Normalização e Qualidade Industrial,<br>Rio de Janeiro, Brésil. |
| 50. Étalon de force électromotrice à diode<br>de Zener, N° 4185005 (addition) . . . . . | EOLAS, the Irish Science and<br>Technology Agency, Dublin,<br>Irlande.                               |

51. Étalon de force électromotrice à diode de Zener, N° 3795044 . . . . .	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, Rio de Janeiro, Brésil.
52. Étalon de résistance de 1 $\Omega$ , N° 1799595 (addition) . . . . .	Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, Lisbonne, Portugal.
53. Quatre étalons secondaires d'intensité lumineuse (2800 K), N°s 41 G 01, 41 G 02, 40 G 01, et 40 G 02 . . . . .	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, Rio de Janeiro, Brésil.
54. Trois étalons secondaires d'intensité lumineuse (2800 K), N°s 406, 537 et 541 . . . . .	Van Swinden Laboratorium, Delft, Pays-Bas.
55. Étalon de force électromotrice à diode de Zener, N° 88062732 (addition) . . . . .	Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, Lisbonne, Portugal.
56. Chambre d'ionisation, Shonka 189 . . . . .	Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm, Suède.
57. Chambre d'ionisation, NE 2561-056 . . . . .	Id.
58. Chambre d'ionisation, NE 2571-2061 . . . . .	Id.
59. Étalon de masse de 1 kg en « Contraperm UM 6 M » . . . . .	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Vienne, Autriche.
60. Étalon de masse de 1 kg en acier inoxydable . . . . .	Centro Español de Metrologia, Madrid, Espagne.
61. Deux étalons secondaires d'intensité lumineuse (2800 K), N°s P57 et P746 . . . . .	National Physical Laboratory, New Delhi, Inde.
62. Six étalons secondaires de flux lumineux (2800 K), N°s P139, P141, P192, P194, P199, P200. . . . .	Id.
63. Chambre d'ionisation, PTW 089 . . . . .	Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, Rio de Janeiro, Brésil.
64. Chambres d'ionisation, NE 2561-207 et NE 2561-264 . . . . .	Id.
65. Chambres d'ionisation, TK01-115 et TK01-141 . . . . .	Id.

## NOTES D'ÉTUDE

1993

N°s

1. Deux calibres en acier de 700 mm et 800 mm, Hommel-Werke . . . . .	Polski Komitet Normalizacji, Miast I Jakości, Varsovie, Pologne.
2. Un calibre en acier de 500 mm, CEJ N° 76008. . . . .	Id.

## VII. — COMPTES

Les tableaux suivants sont la reproduction des tableaux qui figurent dans le « Rapport annuel sur la situation administrative et financière du Bureau international des poids et mesures » relatif à l'exercice 1992.

### Compte I. — Fonds ordinaires\*

#### RECETTES

	francs-or
ACTIF AU 1 <sup>er</sup> JANVIER 1992 . . . . .	12 431 411,07
Recettes budgétaires . . . . .	18 874 141,42
Taxes sur les achats remboursées . . . . .	575 135,71
Total . . . . .	<u>31 880 688,20</u>

#### DÉPENSES

	francs-or
Dépenses budgétaires . . . . .	19 271 728,10
Taxes sur les achats remboursables . . . . .	432 109,46
Différences de change . . . . .	8 646,89
Réévaluation de l'actif au 31 décembre 1992 . . . . .	54 677,68
ACTIF AU 31 DÉCEMBRE 1992 . . . . .	12 113 526,07
Total . . . . .	<u>31 880 688,20</u>

#### DÉTAIL DES RECETTES BUDGÉTAIRES

		francs-or
Versement de contributions :		
au titre de l'exercice 1992 . . . . .	15 189 189	} 17 558 205 } 17 650 609,00
au titre de l'exercice 1991 . . . . .	1 331 034	
au titre de l'exercice 1990 . . . . .	480 987	
au titre de l'exercice 1989 et antérieurs. . . . .	364 448	
au titre de l'exercice 1993 . . . . .	192 547	
Prélèvement sur le compte « Rembour- sement aux États » . . . . .	92 404	
Intérêts des fonds . . . . .		1 223 532,42
Recettes diverses . . . . .		0,00
Total . . . . .		<u>18 874 141,42</u>

\* Dans ce compte, comme dans le reste de ce document, on utilise le franc-or défini par l'équivalence 1 franc-or = 1,814 52 franc français.

*Dépenses du compte I.* — Les dépenses budgétaires en 1992 se sont élevées à 19 271 728,10 francs-or pour un budget voté s'élevant à 21 627 606 francs-or.

DÉTAIL DES DÉPENSES BUDGÉTAIRES

Chapitres	Dépenses de l'exercice	Budget voté	Économies	Dépassements
<i>A. Dépenses de personnel :</i>				
1. Traitements . . . . .	10 456 230,65	11 029 000	572 769,35	—
2. Allocations familiales et sociales . . . . .	1 725 096,29	1 916 000	190 903,71	—
3. Sécurité sociale (a) . . . . .	1 246 364,68	1 161 000	—	85 364,68
4. Assurance accidents du travail . . . . .	39 555,95	201 000	161 444,05	—
5. Caisse de retraites (b) . . . . .	1 765 000,00	1 765 000	—	—
<i>B. Dépenses de fonctionnement :</i>				
1. Mobilier . . . . .	7 117,58	30 000	22 882,42	—
2. Laboratoires et ateliers . . . . .	660 712,76	1 014 000	353 287,24	—
3. Chauffage, eau, énergie électrique . . . . .	507 390,69	429 000	—	78 390,69
4. Assurances . . . . .	56 576,95	63 000	6 423,05	—
5. Impressions et publications . . . . .	138 364,04	208 000	69 635,96	—
6. Frais de bureau . . . . .	324 933,86	386 000	61 066,14	—
7. Voyages et transports d'appareils . . . . .	330 948,57	412 000	81 051,43	—
8. Entretien courant . . . . .	319 092,90	400 000	80 907,10	—
9. Bureau du Comité . . . . .	48 000,00	60 000	12 000,00	—
<i>C. Dépenses d'investissement :</i>				
1. Laboratoires . . . . .	992 021,97	1 730 000	737 978,03	—
2. Atelier de mécanique . . . . .	6 255,10	83 000	76 744,90	—
3. Bibliothèque . . . . .	224 623,89	221 000	—	3 623,89
<i>D. Dépenses de bâtiments (gros travaux d'entretien et de rénovation) . . . . .</i>				
	82 486,89	389 606	307 119,11	—
<i>E. Frais divers et imprévus (c) (d) . . . . .</i>				
	340 955,33	130 000	—	210 955,33
<b>Totaux . . . . .</b>	<b>19 271 728,10</b>	<b>21 627 606</b>	<b>2 734 212,49</b>	<b>378 334,59</b>

(a) Comprenant un virement de 707 369 francs-or au compte VII (Fonds de réserve pour l'assurance maladie).  
 (b) Virement au compte II (Caisse de retraites).  
 (c) Comprenant un virement de 11 738 francs-or au compte IV (Caisse de prêts sociaux).  
 (d) Comprenant un virement de 231 499,75 francs-or au compte VI (Metrologia).

### Compte II. — Caisse de retraites

#### RECETTES

	francs-or
ACTIF AU 1 <sup>er</sup> JANVIER 1992 . . . . .	15 364 041,35
Retenues sur les traitements . . . . .	958 091,53
Virement du compte I . . . . .	1 765 000,00
Intérêts des fonds . . . . .	1 398 110,99
Total . . . . .	<u>19 485 243,87</u>

#### DÉPENSES

	francs-or
Pensions servies . . . . .	3 006 458,17
Remboursement de versements . . . . .	9 169,09
Réévaluation de l'actif au 31 décembre 1992 . . . . .	74 005,36
ACTIF AU 31 DÉCEMBRE 1992 . . . . .	16 395 611,25
Total . . . . .	<u>19 485 243,87</u>

### Compte III. — Fonds spécial pour l'amélioration du matériel scientifique

#### RECETTES

	francs-or
ACTIF AU 1 <sup>er</sup> JANVIER 1992 . . . . .	172 765,56
Total . . . . .	<u>172 765,56</u>

#### DÉPENSES

	francs-or
Réévaluation de l'actif au 31 décembre 1992 . . . . .	769,92
ACTIF AU 31 DÉCEMBRE 1992 . . . . .	171 995,64
Total . . . . .	<u>172 765,56</u>

**Compte IV. — Caisse de prêts sociaux**

RECETTES

		francs-or
ACTIF AU 1 <sup>er</sup> JANVIER 1992	160 218,88	} 327 514,70
Créances au 1 <sup>er</sup> janvier 1992	167 295,82	
Créances nouvelles en cours d'année		151 555,23
Amortissements partiels des prêts :		
Capital	164 539,91	} 169 804,90
Intérêts	5 264,99	
Virement du compte I		11 738,00
Intérêts des fonds		13 655,36
<b>Total</b>		<u><u>674 268,19</u></u>

DÉPENSES

		francs-or
Prêts consentis en cours d'année		151 555,23
Créances amorties en cours d'année		164 539,91
Créances au 31 décembre 1992	154 311,14	} 358 173,05
ACTIF AU 31 DÉCEMBRE 1992	203 861,91	
<b>Total</b>		<u><u>674 268,19</u></u>

Le compte V. — Réserve pour les bâtiments présente un solde nul depuis le 31 décembre 1989, aucun mouvement n'a été enregistré sur ce compte depuis cette date.



### Compte VI. — Metrologia

#### RECETTES

	francs-or
Abonnements encaissés . . . . .	341 437,43
Virement du compte I . . . . .	231 499,75
Total . . . . .	<u>572 937,18</u>

#### DÉPENSES

	francs-or
Dépenses de fonctionnement . . . . .	568 630,81
Dépenses d'investissement . . . . .	4 306,37
Total . . . . .	<u>572 937,18</u>

### Compte VII. — Fonds de réserve pour l'assurance maladie

#### RECETTES

	francs-or
ACTIF AU 1 <sup>er</sup> JANVIER 1992 . . . . .	0,00
Virement du compte I . . . . .	707 369,00
Intérêts des fonds . . . . .	24 650,66
Total . . . . .	<u>732 019,66</u>

#### DÉPENSES

	francs-or
Réévaluation de l'actif au 31 décembre 1992 . . . . .	3 292,08
ACTIF AU 31 DÉCEMBRE 1992 . . . . .	728 727,58
Total . . . . .	<u>732 019,66</u>

**Bilan au 31 décembre 1992**

	francs-or
Compte I « Fonds ordinaires » . . . . .	12 113 526,07
Compte II « Caisse de retraites » . . . . .	16 395 611,25
Compte III « Fonds spécial pour l'amélioration du matériel scientifique » . . . . .	171 995,64
Compte IV « Caisse de prêts sociaux » . . . . .	358 173,05
Compte V « Réserve pour les bâtiments » . . . . .	0,00
Compte VI « Metrologia » . . . . .	0,00
Compte VII « Fonds de réserve pour l'assurance maladie » . . . . .	728 727,58
	<hr/>
ACTIF NET . . . . .	29 768 033,59
	<hr/> <hr/>

Cet actif net se décompose comme suit :

a. Fonds déposés en banque :

	francs-or
1° En monnaie française (1 FRF = 0,551 109 935 FO) . . . . .	800 779,05
2° En monnaie U.S.A. (1 USD = 5,5065 FRF = 3,034 686 859 FO) . . . . .	1 744 074,26
3° En monnaie suisse (1 CHF = 3,7820 FRF = 2,084 297 776 FO) . . . . .	1 386 211,80
4° En monnaie britannique (1 GBP = 8,3535 FRF = 4,603 696 845 FO) . . . . .	20 659,78
5° En monnaie allemande (1 DEM = 3,4096 FRF = 1,879 064 436 FO) . . . . .	3 746 854,48
6° En monnaie japonaise (100 JPY = 4,4141 FRF = 2,432 654 366 FO) . . . . .	1 283 225,18
7° En monnaie hongroise (1 HUF = 0,0650 FRF = 0,035 822 146 FO) . . . . .	3 616,14
8° En monnaie polonaise (100 PLZ = 0,0358 FRF = 0,019 729 736 FO) . . . . .	152,13
9° En monnaie néerlandaise (1 NLG = 3,0354 FRF = 1,672 839 098 FO) . . . . .	8 962 070,72
10° En ECU (1 XEU = 6,6545 FRF = 3,667 361 065 FO) . . . . .	7 777 500,86
11° En monnaie danoise (1 DKK = 0,8803 FRS = 0,485 142 076 FO) . . . . .	3 881 136,61

b. Espèces en caisse . . . . . 7 441,44

ACTIF BRUT . . . . . 29 613 722,45

c. Créances de la Caisse de prêts sociaux . . . . . 154 311,14

ACTIF NET . . . . . 29 768 033,59

Compte « Remboursement aux États »

	francs-or
Situation au 1 <sup>er</sup> janvier 1992 . . . . .	92 404,00
Virement au compte I (compensation du remboursement d'avances faites pour la Roumanie) . . . . .	- 92 404,00
	<hr/>
Situation au 31 décembre 1992 . . . . .	0,00
	<hr/> <hr/>

---

LA TROISIÈME VÉRIFICATION PÉRIODIQUE  
DES  
PROTOTYPES NATIONAUX DU KILOGRAMME  
(1988-1992)

par G. GIRARD

Bureau international des poids et mesures

---

*Introduction*

La Convention du Mètre signée à Paris le 20 mai 1875 par les représentants de dix-sept États indique, dans son article 6 :

« *Le Bureau international des poids et mesures est chargé :*

...

3° *Des comparaisons périodiques des étalons nationaux avec les prototypes internationaux et avec leurs témoins, ainsi que de celles des thermomètres étalons ;*

... »

La masse du prototype international du kilogramme représente l'unité de masse. Chacune de ces comparaisons périodiques est connue sous le nom de *vérification périodique*.

La première vérification périodique a eu lieu de 1899 à 1911 sans participation du prototype international. La deuxième vérification périodique commença en 1939, fut interrompue par la Seconde Guerre mondiale et reprise en totalité à partir de 1946 ; elle s'acheva en 1953 et les résultats complets furent présentés à la 10<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures en 1954 [1]. La troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme a été prévue par la Résolution 1 de la 18<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures en 1987. Elle débuta à l'automne 1988 pour se terminer à l'automne 1992.

Les étalons en présence (*voir* tableau I) sont : le prototype international  $K$ , ses six témoins K1, n<sup>os</sup> 7, 8(41), 32, 43 et 47, tous conservés au BIPM dans le coffre-fort du Caveau inférieur, et les prototypes du BIPM d'usage exceptionnel n<sup>o</sup> 25, et d'usage courant n<sup>os</sup> 9, 31 et 67. Deux témoins (n<sup>os</sup> 8(41) et 32) ont été choisis pour servir d'étalons de référence lors de la vérification des prototypes nationaux elle-même.

À cette occasion tous les pays ayant au moins un prototype en platine iridié ont répondu favorablement à la demande du BIPM de lui envoyer leur prototype national, ce qui a fait trente-quatre étalons. Cinq nouveaux prototypes de fabrication récente (usinés, polis et ajustés au BIPM à l'aide d'un outil à pointe de diamant), dont trois attribués à Israël (n° 71), à la République de Corée (n° 72) et au Canada (n° 74), un, acheté par le Gouvernement de Hong Kong (n° 75) et un autre conservé par le BIPM (n° 77), ont été ajoutés aux trente-quatre précédents ; ils ne sont pas obligatoirement des prototypes nationaux. Le prototype n° 34 appartenant à l'Académie des sciences de Paris a été introduit dans la troisième vérification périodique car nous sommes certains qu'il n'a pas été utilisé depuis 1961 (il est resté dans son étui de voyage scellé).

TABLEAU I

Prototype international	♠					
Témoins	K1	7	8(41)*	32	43	47
Prototypes du BIPM			25			
d'usage exceptionnel		9	31	67		
d'usage courant	G1		G2		G3	G4
Prototypes nationaux	12		21		5	2
	16		36		6	20
	23		37		18	46
	35		38		24	57
	39		40		50	
	48		44		55	
	49		53		56	
	51		54		58	
	68		60		66	
	70		65		69	
Nouveaux prototypes						71
						72
						74
						75
						77
Autre prototype						34

\* Lors de sa fabrication ce témoin a été marqué 41 par erreur au lieu de 8.

Les étalons utilisés pour la troisième vérification peuvent être classés de la manière suivante : le prototype international, les témoins, les prototypes du BIPM d'usage exceptionnel ou d'usage courant, les prototypes nationaux, les nouveaux prototypes et un autre prototype (n° 34). Pour les besoins de la vérification, les prototypes nationaux, les nouveaux prototypes et l'autre prototype ont été répartis en quatre groupes dénommés G1 à G4.

Le schéma d'exécution de la troisième vérification périodique des prototypes nationaux est présenté à la figure 1.

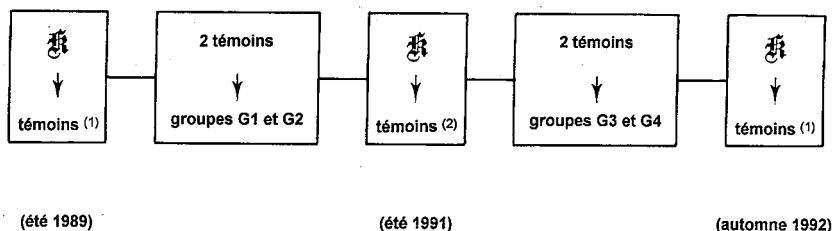


Fig. 1. — Schéma de la troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme. Le prototype international,  $\mathfrak{K}$ , a été utilisé à trois reprises pour des comparaisons avec ses six témoins et les quatre prototypes du BIPM <sup>(1)</sup> et trois témoins et deux prototypes du BIPM <sup>(2)</sup>. Deux témoins ont été choisis pour être comparés aux prototypes nationaux répartis dans les groupes G1 à G4.

La première et la dernière comparaison du prototype international  $\mathfrak{K}$  à ses six témoins et aux quatre prototypes d'usage du BIPM ont été effectuées respectivement à l'été 1989 et à l'automne 1992.

Pendant la durée de la troisième vérification, les prototypes du BIPM n<sup>os</sup> 9 et 31 n'ont été soumis à aucun processus de nettoyage et de lavage (ce traitement a eu lieu pour la dernière fois en 1978).

### Comparaisons préliminaires

À l'automne 1988, le prototype international, ses témoins et le prototype n<sup>o</sup> 25 ont été comparés aux prototypes n<sup>os</sup> 9 et 31 avant, après un premier, puis un deuxième nettoyage-lavage (*voir* figure 2). On a constaté que l'effet de ces traitements sur ces étalons n'était pas négligeable, ce qui a confirmé ce qui avait été mesuré sur des étalons en platine iridié venus au BIPM depuis 1973 pour y être comparés à nos prototypes d'usage courant. La figure 3 indique le changement de masse ( $\Delta m$ ) causé par le nettoyage-lavage de ces prototypes en fonction du nombre d'années écoulées depuis le précédent nettoyage-lavage. La droite de pente  $-1 \mu\text{g/a}$  est celle qui passe au mieux par les points  $\bullet$  (le point représentant le prototype n<sup>o</sup> 57 n'a pas été pris en compte). Les données relatives aux prototypes dont l'état de surface est de mauvaise qualité sont représentées par des cercles  $\circ$ . Elles n'ont pas été prises en compte dans le calcul de la droite. Cette droite ne passe pas par l'origine, ce qui indiquerait que l'effet de pollution dans le temps est plus rapide au début, après un nettoyage-lavage.

En 1985, l'évolution de la masse du prototype n<sup>o</sup> 18 après nettoyage-lavage avait été suivie pendant 415 jours, mais les comparaisons par rapport à deux étalons de référence n'avaient commencé qu'après 26 jours [2, (Fig. 9)]. Les indications fournies par cette étude nous ont conduit à en entreprendre une autre, similaire, consistant à suivre l'évolution de la masse du prototype international juste après qu'il ait été soumis à un processus de nettoyage-lavage, car c'est cette masse qui sert de référence par excellence.

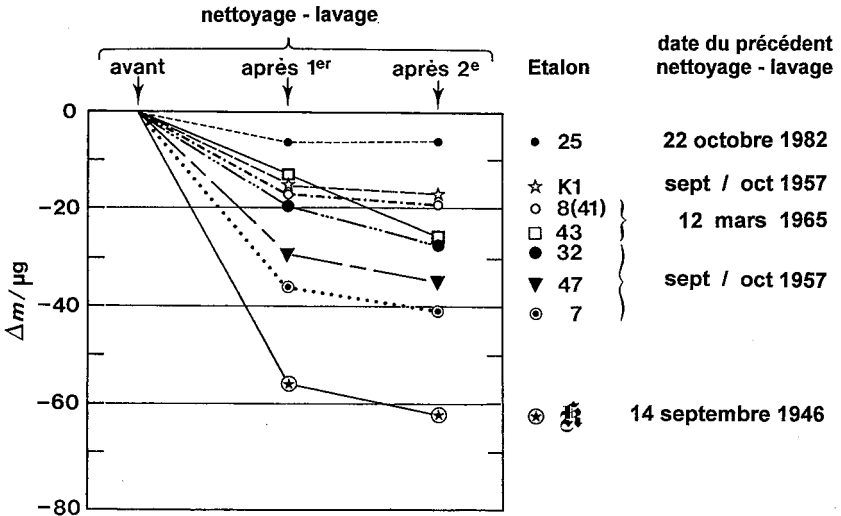


Fig. 2. — Variation de masse  $\Delta m$  observée après chacun des nettoyages et lavages du prototype international  $\mathfrak{K}$ , de ses six témoins et du prototype n° 25.

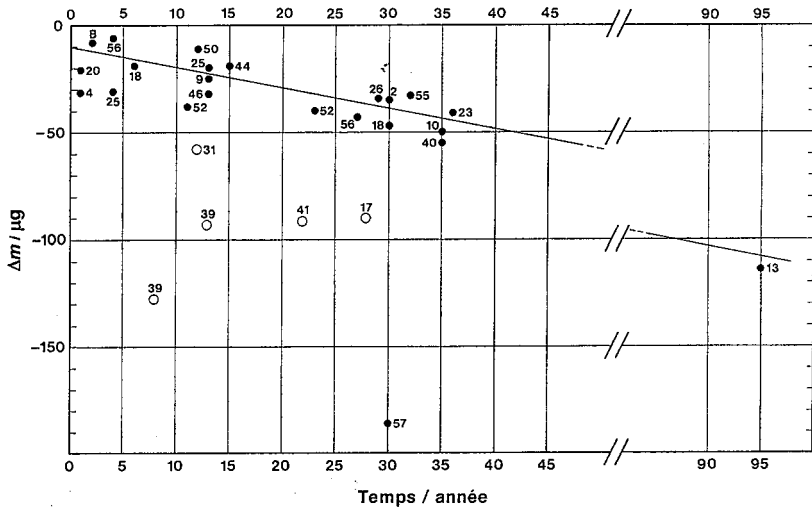


Fig. 3. — Variation de masse  $\Delta m$  causée par le nettoyage et lavage de prototypes en platine iridiée en fonction du nombre d'années écoulées depuis leur dernier nettoyage-lavage. Les cercles  $\circ$  représentent les prototypes ayant un état de surface de mauvaise qualité.

Cette étude a associé le prototype international, le témoin n° 7 et deux étalons, n°s 67 et 73, fabriqués à l'outil à pointe de diamant, aux deux prototypes de référence n°s 9 et 31. La figure 4 indique que pendant les cent-vingt premiers jours, la dérive de la masse du prototype international est linéaire et a pour valeur  $+0,0368 \mu\text{g/d}$ . Cette valeur a été utilisée par la suite pour tous les prototypes au cours de la troisième vérification.

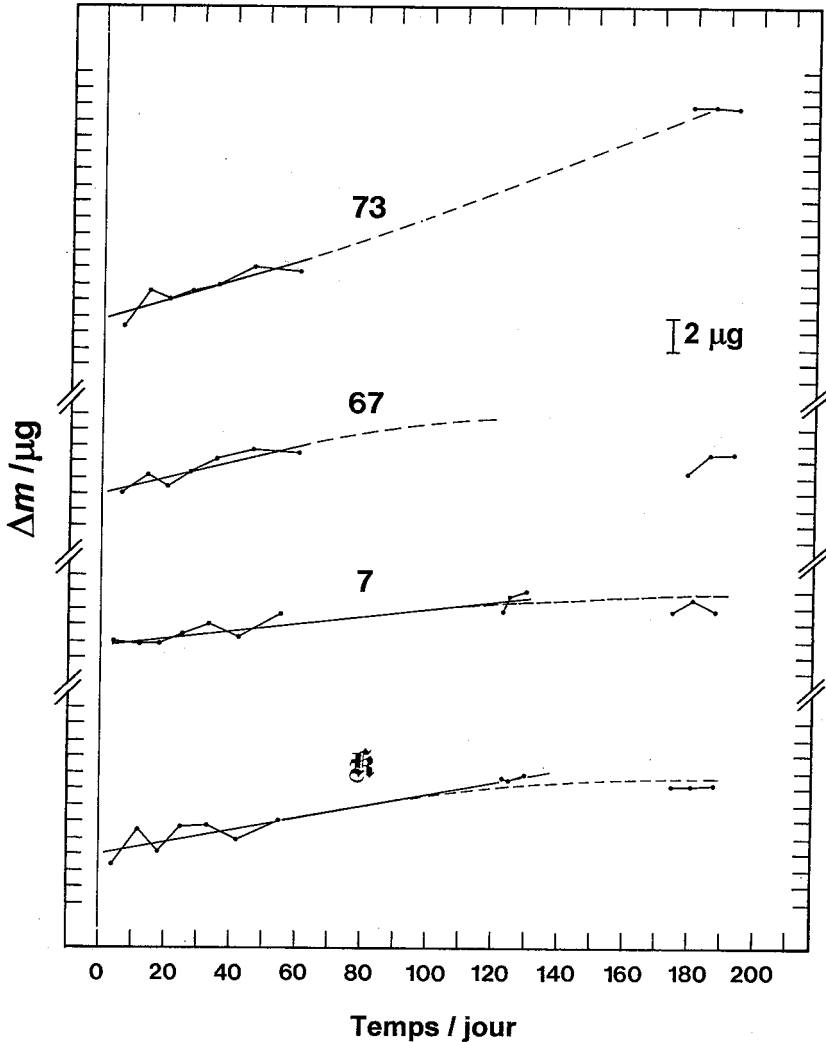


Fig. 4. — Augmentation de masse  $\Delta m$  dans les six premiers mois suivant le nettoyage-lavage observée sur le prototype international  $\mathcal{I}$ , un témoin (n° 7) et deux prototypes fabriqués (polis et ajustés) à l'aide d'un outil à pointe de diamant.

### Comparaisons au prototype international

La comparaison au prototype international de ses six témoins et des quatre prototypes d'usage du BIPM a eu lieu durant l'été 1989.

La balance NBS-2 a été utilisée pour les pesées de la troisième vérification périodique (voir Annexe 1). Puisqu'elle permet de disposer six étalons sur son transporteur, le schéma de comparaison ci-dessous a été adopté : il est constitué de quatre *balancées* :

- a)  $\mathfrak{K}$  et cinq prototypes y compris le n° 31 ;
- b)  $\mathfrak{K}$  et cinq autres prototypes y compris le n° 9 ;
- c) trois prototypes de la balancée a) y compris le n° 31 et trois prototypes de la balancée b) dont le n° 9 ;
- d) les deux autres prototypes de la balancée a) et le n° 31 ainsi que les deux autres prototypes de la balancée b) et le n° 9.

À partir de la valeur du prototype international (toujours 1 kg exactement) on en a déduit celle des autres prototypes. La figure 5 représente l'évolution de la masse, par rapport à celle du prototype international, des quatre témoins (K1, n°s 7, 8(41) et 32) et du prototype n° 25, entre 1889 et 1989, et des deux autres (n°s 43 et 47) depuis 1946. L'évolution des prototypes n°s 9 et 31 n'a pas été portée sur cette figure du fait qu'ils n'ont été ni nettoyés ni lavés.

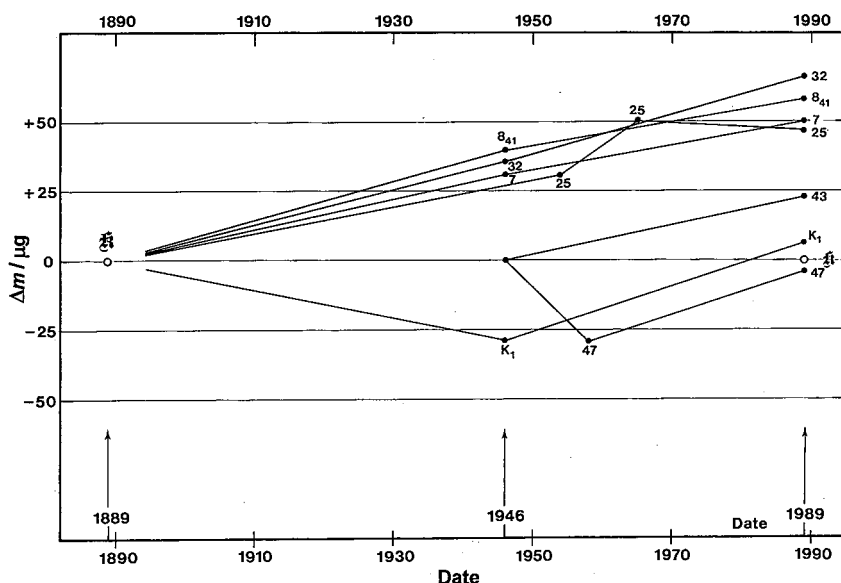


Fig. 5. — Évolution de la masse  $\Delta m$  des six témoins et du prototype n° 25 par rapport à celle du prototype international  $\mathfrak{K}$ .

Ces résultats ont amené le CIPM, en septembre 1989, à prendre deux décisions [3] :

1. interpréter la définition du kilogramme de 1889 en se référant à la masse du prototype international juste après qu'il ait été nettoyé et lavé suivant la méthode du BIPM [4] et déduire cette masse par extrapolation en utilisant la dérive de  $+0,0368 \mu\text{g/d}$  ;
2. laisser le soin au président du CCM et au directeur du BIPM, après consultation du groupe de travail sur les étalons de masse du CCM, de



décider si les prototypes nationaux soumis à la troisième vérification périodique doivent être nettoyés et lavés.

En novembre 1989, le groupe de travail indiqua que les prototypes nationaux devaient bien être nettoyés et lavés ; cette opinion fut acceptée.

### Vérification des prototypes nationaux

Les quarante prototypes nationaux et assimilés ont été répartis en quatre groupes de dix pris dans l'ordre d'arrivée au BIPM. À chaque groupe (Tableau I, G1 à G4) ont été joints les deux témoins n<sup>os</sup> 8(41) et 32.

Le mode opératoire suivi pour les mesures du groupe G1 est le suivant :

1. Les prototypes du groupe G1 ont été comparés dans l'état de leur arrivée au BIPM, c'est-à-dire avant leurs deux nettoyages-lavages, à deux étalons en platine iridié du BIPM.
2. Les prototypes n<sup>os</sup> 9 et 31 ont été comparés aux deux témoins
  - a) avant le nettoyage-lavage de ces deux témoins ;
  - b) après le nettoyage-lavage de ces deux témoins et des prototypes du groupe G1 qui eut lieu approximativement en même temps.
3. Les dix prototypes du groupe G1 ont été comparés aux deux témoins, en quatre *balancées* de la manière suivante :
  - a) n<sup>o</sup> 8(41) à cinq prototypes ;
  - b) n<sup>o</sup> 32 aux cinq autres prototypes ;
  - c) n<sup>o</sup> 8(41) à deux prototypes de la balancée a) et trois prototypes de la balancée b) ;
  - d) n<sup>o</sup> 32 aux trois autres prototypes de la balancée a) et deux autres prototypes de la balancée b).
4. Les prototypes n<sup>os</sup> 9 et 31 ont été comparés de nouveau aux deux témoins.

La même procédure a été adoptée pour le groupe G3. Pour les groupes G2 et G4, la séquence 2a) a été omise puisqu'elle est identique à la séquence 4 du groupe précédent.

Entre les mesures du groupe G2 et du groupe G3 de nouvelles comparaisons au prototype international ont été effectuées, faisant intervenir les deux témoins n<sup>os</sup> 8(41) et 32, les prototypes n<sup>os</sup> 9 et 31, le témoin n<sup>o</sup> 7 déjà utilisé dans une étude présentée page G 4. Le but de ces comparaisons était de vérifier la stabilité des deux témoins n<sup>os</sup> 8(41) et 32.

Après les mesures sur le groupe G4, une nouvelle comparaison du prototype international, de ses témoins et des prototypes d'usage du BIPM a eu lieu. Ainsi s'est terminée la troisième vérification périodique des prototypes nationaux à l'automne 1992.

## Résultats

Toutes les pesées ont été effectuées à la balance NBS-2 sauf les pesées avant nettoyage-lavage des groupes G3 et G4 qui l'ont été à la balance Mettler HK 1000 MC.

Les corrections de poussée de l'air ont été calculées à l'aide de la « Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981) » [5] — et non celle de 1991 [6] — puisque la troisième vérification périodique a commencé en 1988. Étant données les faibles différences de volume entre les prototypes en présence, ce changement n'a aucune influence significative sur le résultat. Les instruments permettant la mesure de la température, de la pression, de l'humidité et de la teneur en CO<sub>2</sub> ont été vérifiées à plusieurs reprises. L'incertitude causée par la détermination de ces paramètres est ici négligeable (*voir* Annexe 2).

Au fur et à mesure du déroulement des comparaisons il a été possible de calculer des valeurs provisoires de la masse soit des témoins et étalons du BIPM, par rapport à celle du prototype international, soit des prototypes nationaux par rapport à celles des témoins n<sup>os</sup> 8(41) et 32. Il est apparu que la masse de ceux-ci avait diminué d'une quantité significative durant les trois années de la vérification. Étant donné que ces deux témoins font la liaison entre le prototype international et les prototypes nationaux, l'évolution de leur masse doit être examinée de près.

Un calcul prenant en compte toutes les observations faites entre les prototypes a été effectué en suivant différentes hypothèses. Celle qui a semblé finalement être la meilleure est celle qui admet pour chacun des témoins n<sup>os</sup> 8(41) et 32 un coefficient de variation de leur masse en fonction de l'utilisation et pour les autres une stabilité au cours des mesures. Il est bien entendu que l'on a tenu compte du coefficient d'évolution de la masse après nettoyage-lavage mentionné page G 4 pour éliminer cette augmentation de masse entre la date du dernier nettoyage-lavage et celle des comparaisons.

Tous les calculs effectués suivant différentes hypothèses ont permis de constater que la masse du prototype du BIPM n<sup>o</sup> 67 était instable durant la vérification périodique. Il a donc fallu décider de ne pas tenir compte de toutes les observations faites avec ce prototype (été 1989 et automne 1992).

Après la troisième vérification, des comparaisons ont été effectuées à l'aide de prototypes de différents groupes. Elles ont donné des résultats satisfaisants.

Le calcul final a conduit aux valeurs de la masse des prototypes ayant participé à la troisième vérification périodique indiquées dans le tableau II.

Le tableau III indique l'évolution de la masse, par rapport à celle du prototype international, des témoins, des prototypes d'usage du BIPM ainsi que d'autres prototypes. Cette évolution, pour les témoins n<sup>os</sup> 8(41) et 32 et certains prototypes nationaux depuis leur origine, est montrée dans les figures 6, 7 et 8. Cette origine est considérée être, soit la distribution

TABLEAU II

*Résultats de la troisième vérification périodique  
des prototypes nationaux du kilogramme  
(mai 1989 - octobre 1992)*

Prototype international		砵 1 kg	
Témoins	K1	1 kg + 0,135 mg	n° 32 1 kg + 0,139 mg
	n° 7	1 kg - 0,481 mg	n° 43 1 kg + 0,330 mg
	n° 8(41)	1 kg + 0,321 mg	n° 47 1 kg + 0,403 mg
Prototypes du BIPM		n° 25 1 kg + 0,158 mg	
		n° 9 1 kg + 0,312 mg	
		n° 31 1 kg + 0,131 mg	
Prototypes nationaux et autres prototypes	n° 2	Roumanie	1 kg - 1,127 mg
	n° 5	Italie	1 kg + 0,064 mg
	n° 6	Japon	1 kg + 0,176 mg
	n° 12	Féd. de Russie	1 kg + 0,100 mg
	n° 16	Hongrie	1 kg + 0,012 mg
	n° 18	Royaume-Uni	1 kg + 0,053 mg
	n° 20	É.-U. d'Amérique	1 kg - 0,021 mg
	n° 21	Mexique	1 kg + 0,068 mg
	n° 23	Finlande	1 kg + 0,193 mg
	n° 24	Espagne	1 kg - 0,146 mg
	n° 34	Académie des sciences de Paris	1 kg - 0,051 mg
	n° 35	France	1 kg + 0,189 mg
	n° 36	Norvège	1 kg + 0,206 mg
	n° 37	Belgique	1 kg + 0,258 mg
	n° 38	Suisse	1 kg + 0,242 mg
	n° 39	Rép. de Corée	1 kg - 0,783 mg
	n° 40	Suède	1 kg - 0,035 mg
	n° 44	Australie	1 kg + 0,287 mg
	n° 46	Indonésie	1 kg + 0,321 mg
	n° 48	Danemark	1 kg + 0,112 mg
	n° 49	Autriche	1 kg - 0,271 mg
	n° 50	Canada	1 kg - 0,111 mg
	n° 51	Pologne	1 kg + 0,227 mg
	n° 53	Pays-Bas	1 kg + 0,121 mg
	n° 54	Turquie	1 kg + 0,203 mg
	n° 55	Rép. féd. d'Allemagne	1 kg + 0,252 mg
	n° 56	Afrique du Sud	1 kg + 0,240 mg
	n° 57	Inde	1 kg - 0,036 mg
	n° 58	Égypte	1 kg - 0,120 mg
	n° 60	Rép. pop. de Chine	1 kg + 0,295 mg
n° 65	Rép. slovaque	1 kg + 0,208 mg	
n° 66	Brésil	1 kg + 0,135 mg	
n° 68	Rép. pop. dém. de Corée	1 kg + 0,365 mg	
n° 69	Portugal	1 kg + 0,207 mg	
n° 70	Rép. féd. d'Allemagne	1 kg - 0,236 mg	
n° 71	Israël	1 kg + 0,372 mg	
n° 72	Rép. de Corée	1 kg + 0,446 mg	
n° 74	Canada	1 kg + 0,446 mg	
n° 75	Hong Kong	1 kg + 0,132 mg	
n° 3	Espagne	1 kg + 0,077 mg	
n° 62	Italie (IMGC)	1 kg - 0,907 mg	
n° 64	Rép. pop. de Chine	1 kg + 0,251 mg	

TABLEAU III

*Évolution de la masse  
de prototypes en platine iridié*  
(excès sur la valeur nominale, en µg)

n°	Pays	1889 (1)	1946/53 (2)	1989/92 (3)	(2)-(1)	(3)-(1)
⌘	Prototype international	0	0	0	0	0
K1	Témoin	+ 127	+ 98	+ 135	- 29	+ 8
7	Témoin	- 530	- 499	- 481	+ 31	+ 49
8(41)	Témoin	+ 260	+ 300	+ 321	+ 40	+ 61
32	Témoin	+ 70	+ 107	+ 139	+ 37	+ 69
43	Témoin		+ 306	+ 330		
47	Témoin		+ 405	+ 403		
2	Roumanie	- 953	- 992	- 1127	- 39	- 174
5	Italie	+ 18	+ 18	+ 64	0	+ 46
6	Japon	+ 169	+ 170	+ 176	+ 1	+ 7
12	Fédération de Russie	+ 68	+ 85	+ 100	+ 17	+ 32
16	Hongrie	+ 56	- 6	+ 12	- 62	- 44
18	Royaume-Uni	+ 70	+ 71	+ 53	+ 1	- 17
20	États-Unis d'Amérique	- 39	- 19	- 21	+ 20	+ 18
21	Mexique	+ 63	+ 63	+ 68	0	+ 5
23	Finlande	+ 61	+ 98	+ 193	+ 37	+ 132
24	Espagne	- 191	- 173	- 146	+ 18	+ 45
34	Acad. sci. Paris	- 73	- 78	- 51	- 5	+ 22
35	France	+ 191	+ 183	+ 189	- 8	- 2
36	Norvège	+ 157	+ 186	+ 206	+ 29	+ 49
37	Belgique	+ 244	+ 251	+ 258	+ 7	+ 14
38	Suisse	+ 183	+ 214	+ 242	+ 31	+ 59
39	Rép. de Corée	- 118		- 783		- 665
40	Suède	- 37	- 39	- 35	- 2	+ 2
44	Australie		+ 270	+ 287		
46	Indonésie		+ 294	+ 321		
48	Danemark		+ 81	+ 112		
49	Autriche		- 325	- 271		
50	Canada		- 130	- 111		
51	Pologne		+ 185	+ 227		
53	Pays-Bas		+ 85	+ 121		
54	Turquie		+ 160	+ 203		
55	Rép. féd. d'Allemagne		+ 208	+ 252		
3	Espagne	+ 21	+ 44	+ 77	+ 23	+ 56

initiale en 1889 pour les prototypes dont les numéros sont compris entre 1 et 40, soit leur première participation à une vérification périodique pour les prototypes n<sup>os</sup> 41 à 55, c'est-à-dire lors de la deuxième vérification périodique (1946-1953). Les prototypes n<sup>os</sup> 56 à 72, 74, 75 et 77 ont été comparés pour la première fois dans une vérification périodique, lors de la troisième.

Il est possible de connaître l'effet du nettoyage-lavage sur la masse du prototype international, des témoins et des autres prototypes en comparant leur masse avant nettoyage-lavage à celle qu'ils avaient, après. La figure 9

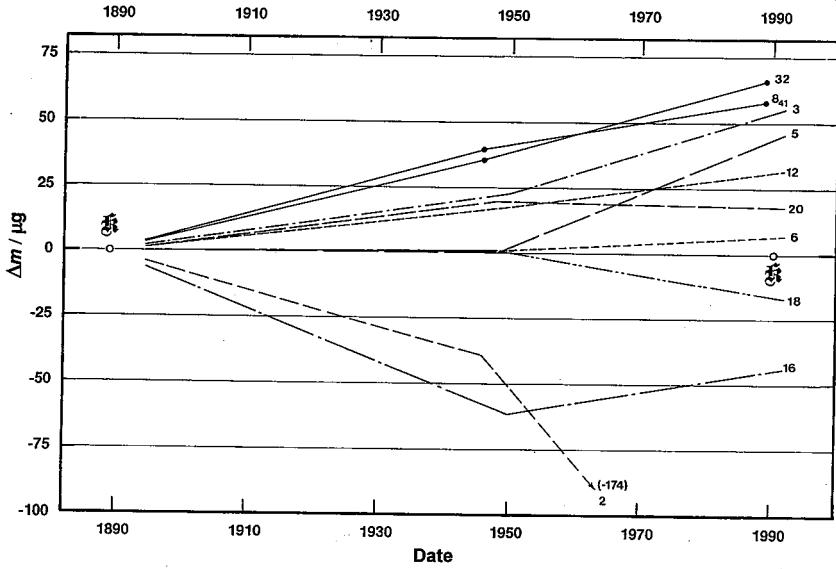


Fig. 6. — Évolution de la masse  $\Delta m$  des prototypes nationaux n° 2 à n° 20 et des deux témoins n° 8(41) et n° 32, par rapport à celle du prototype international  $\mathfrak{I}$ .

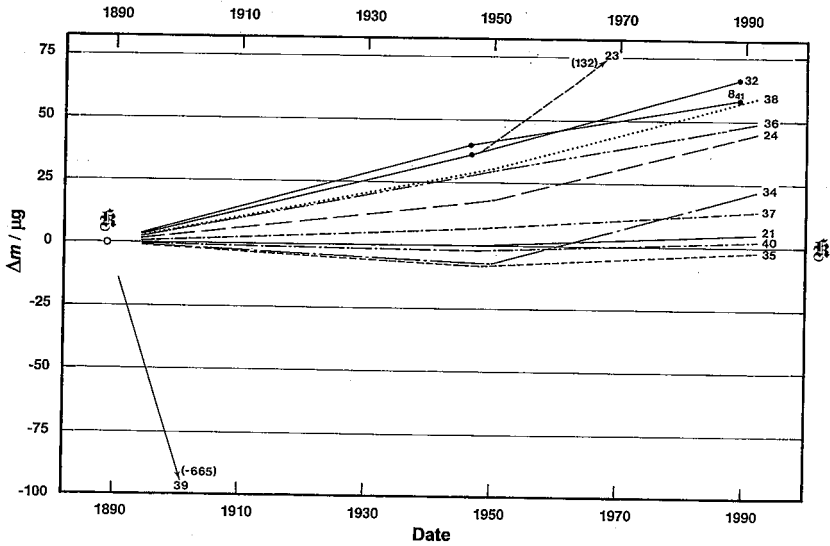


Fig. 7. — Évolution de la masse  $\Delta m$  des prototypes nationaux n° 21 à n° 40 et des deux témoins n° 8(41) et n° 32, par rapport à celle du prototype international  $\mathfrak{I}$ .

indique l'effet de ce traitement sur chaque prototype en fonction du nombre d'années écoulées depuis le précédent nettoyage-lavage. On constate que

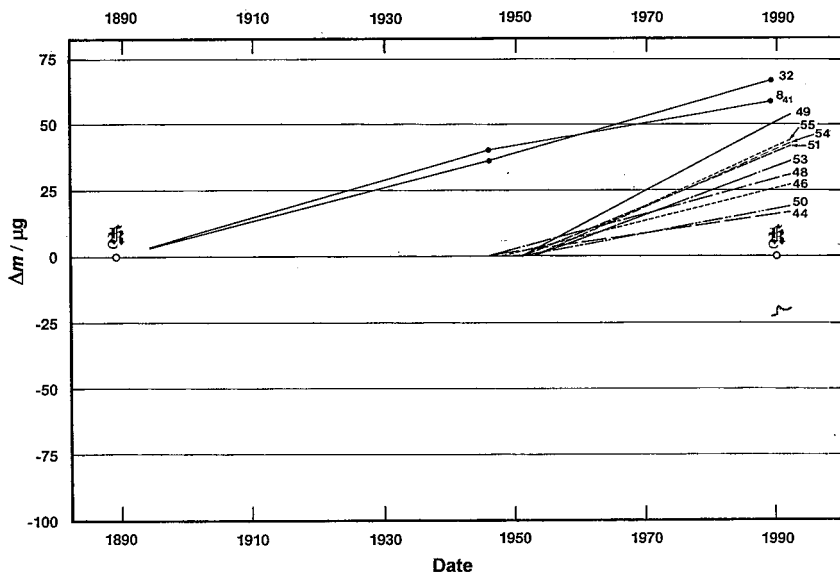


Fig. 8. — Évolution de la masse  $\Delta m$  des prototypes nationaux n° 44 à n° 55 et des deux témoins n° 8(41) et n° 32, par rapport à celle du prototype international  $\mathfrak{K}$ .

les points représentatifs des prototypes sont beaucoup plus dispersés que sur la figure 3 qui est résumée par la droite de pente  $-1 \mu\text{g/a}$ .

### Comparaisons de rattachement

La République populaire de Chine et l'Espagne avaient envoyé au BIPM deux prototypes. Seuls les prototypes nationaux, respectivement n° 60 et 24, ont été inclus dans la troisième vérification périodique. Les seconds prototypes, respectivement n° 64 et 3, ont été comparés à nos deux étalons d'usage n° 9 et 31 et à leurs prototypes nationaux dès la fin de la troisième vérification. Ces observations ont été incluses dans le calcul final. La masse de ces prototypes est :

$$\text{n° 64} \quad 1 \text{ kg} + 0,251 \text{ mg} ;$$

$$\text{n° 3} \quad 1 \text{ kg} + 0,077 \text{ mg}.$$

L'Istituto di Metrologia G. Colonnetti à Turin (Italie) avait adressé une demande au BIPM pour que son prototype en platine iridié n° 62 soit étalonné à l'occasion de la troisième vérification. Il a été comparé, entre autres, aux deux prototypes d'usage courant n° 9 et 31 au début de 1993. Sa masse est :

$$\text{n° 62} \quad 1 \text{ kg} - 0,907 \text{ mg}.$$

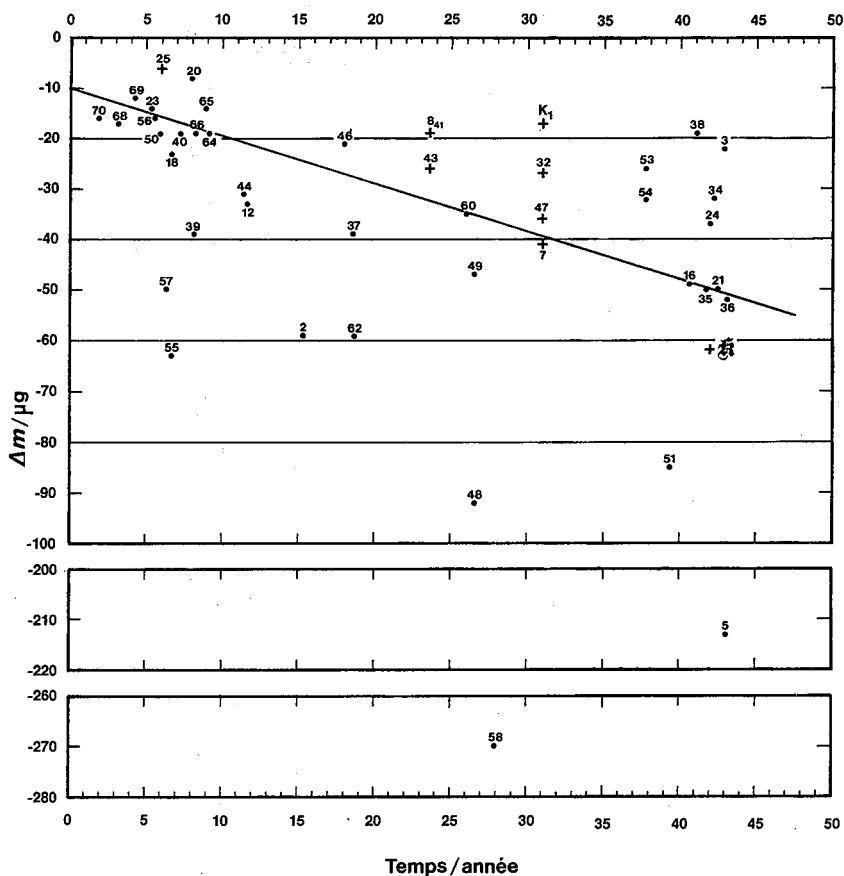


Fig. 9. — Variation de masse  $\Delta m$  causée par le nettoyage-lavage des prototypes ayant participé à la troisième vérification périodique, en fonction du nombre d'années écoulées depuis leur précédent nettoyage-lavage. (● prototypes nationaux ; + prototype international, ses témoins et le prototype n° 25).

### Calcul des incertitudes

Les comparaisons de prototypes à l'intérieur d'un groupe, soit avec le prototype international, soit avec les deux témoins, permettent, par la méthode des moindres carrés, de calculer la masse de chacun d'eux à partir de celle de la référence admise. Ce calcul permet d'obtenir également l'écart-type d'une observation et celui de la masse d'un étalon inconnu.

Pour les sept groupes réalisés pendant la troisième vérification périodique, l'écart-type sur une observation était de 1,1  $\mu\text{g}$  à 1,5  $\mu\text{g}$ , et celui sur la valeur de la masse d'un étalon était de 0,4  $\mu\text{g}$  à 0,6  $\mu\text{g}$ . Ces incertitudes sont de type A puisqu'elles sont issues d'un calcul statistique.

De la même façon, dans le calcul final où l'on a tenu compte de toutes les observations, on a obtenu un écart-type de  $1,58 \mu\text{g}$  sur une observation et pour la valeur de la masse d'un prototype, un écart-type compris entre  $0,35 \mu\text{g}$  et  $0,65 \mu\text{g}$  suivant la fréquence où le prototype a été introduit dans le schéma de comparaisons. On peut constater que cette valeur de  $1,58 \mu\text{g}$  est légèrement supérieure à celles calculées pour un seul groupe. Ceci est dû au fait que l'hypothèse admise n'est peut-être pas tout à fait exacte (la masse des témoins n<sup>os</sup> 8(41) et 32 varie en fonction de leur utilisation).

Pour l'estimation de l'incertitude liée à cette hypothèse, deux méthodes ont été utilisées :

— D'une part, le calcul final permet d'obtenir la moyenne des masses des deux témoins à chaque utilisation à partir de leur valeur après le nettoyage-lavage initial et le coefficient de variation de leur masse en fonction du nombre d'utilisations ; ce sont les cercles  $\circ$  de la figure 10.

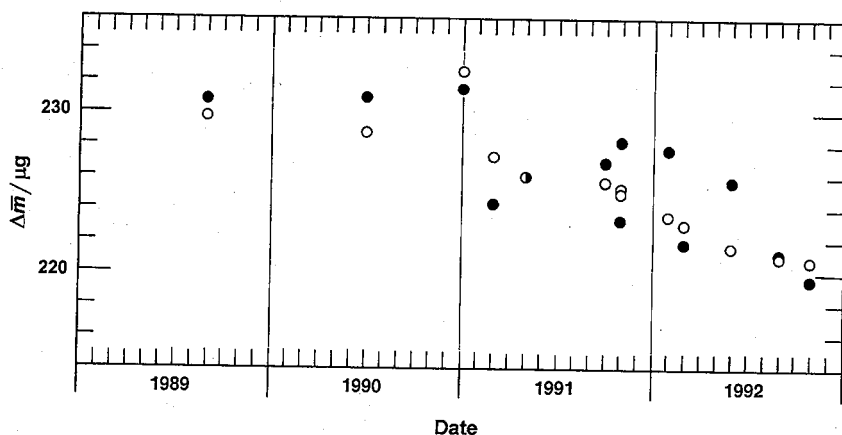


Fig. 10. — Variation de l'excès  $\Delta\bar{m}$  sur la valeur nominale de la moyenne des masses des deux témoins n<sup>o</sup> 8(41) et n<sup>o</sup> 32. Les points  $\bullet$  représentent les valeurs trouvées au fur et à mesure des groupes. Les cercles  $\circ$  représentent les valeurs obtenues à partir du calcul final.

— D'autre part, en s'appuyant sur les trois groupes où intervient le prototype international et sur les comparaisons des deux témoins aux prototypes d'usage du BIPM n<sup>os</sup> 9 et 31, on peut connaître la valeur à attribuer aux masses de ces deux témoins pour chaque groupe de prototypes nationaux ; ce sont les points  $\bullet$  de la figure 10.

Ces deux possibilités de calcul conduisent à des valeurs de la masse des deux témoins légèrement différentes. L'écart-type de ces treize différences est de  $2,3 \mu\text{g}$  ; il donne une évaluation de l'incertitude supplémentaire, aussi de type A. Cette incertitude supplémentaire se propage directement aux prototypes des groupes G1 à G4 puisque la moyenne des masses des deux témoins est ce qui les rattache à celle du prototype international. L'incertitude composée,  $u_c$  (avec  $k = 1$ ) pour la masse de chaque prototype des groupes G1 à G4 est ainsi de  $2,3 \mu\text{g}$  et pour 12 degrés de liberté. Cette



incertitude composée est essentiellement dominée par l'incertitude de la moyenne des masses des deux témoins.

### Conclusions

Des comparaisons effectuées au cours de la troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme, il est possible de tirer quelques conclusions.

L'évolution de la masse des prototypes fabriqués à partir de 1886 (n<sup>os</sup> 1 à 40) dont la valeur de la masse a été sanctionnée à la Première Conférence générale des poids et mesures en 1889, et qui sont revenus à l'occasion de la troisième vérification périodique, confirme les valeurs obtenues à la deuxième vérification périodique (1946-1953). À noter que cette masse à laquelle on se réfère est celle obtenue juste après nettoyage-lavage et non pas celle dont il est question précédemment (*voir* figure 3), qui est la masse déterminée avant nettoyage-lavage, ce traitement ayant pour but d'éliminer la contamination. Il y a bien sûr des étalons accidentés qui ne sont pas à prendre en compte (n<sup>os</sup> 2, 16, 39). Il faut noter aussi le comportement particulier du prototype n<sup>o</sup> 23 depuis 1948.

La masse des prototypes nationaux de ce premier lot qui paraissent avoir été bien conservés et bien utilisés a en moyenne augmenté de 0,25  $\mu\text{g/a}$ .

La masse des prototypes qui ont participé à la troisième vérification et dont les numéros sont compris entre 44 et 55 montre une évolution plus rapide, de l'ordre de 0,9  $\mu\text{g/a}$  depuis la deuxième vérification périodique.

Il faut toutefois interpréter l'ampleur de ces évolutions avec précaution. C'est probablement la somme de la variation relative de leur masse par rapport à celle du prototype international, de l'usure qui a pu être provoquée par leur utilisation, de l'augmentation de leur masse par une contamination irréversible de leur surface et également d'autres causes encore inconnues.

Le cas du prototype n<sup>o</sup> 34, appartenant à l'Académie des sciences de Paris et qui n'est pas le prototype national de la France, est particulier. Il a été étalonné à l'origine, puis en 1950 et pendant la troisième vérification. Il a été utilisé en 1961 au BIPM pour quelques comparaisons spéciales. Depuis, il a été conservé dans son étui de voyage et il est certain qu'il n'a pas été utilisé. Ses valeurs successives sont :

1889	1 kg – 0,073 mg ;
1950	1 kg – 0,078 mg ;
1992	1 kg – 0,051 mg.

L'augmentation de sa masse relative à celle du prototype international (+ 0,027 mg), entre 1950 et 1992, peut être considérée comme significative et sûre.

La figure 9, qui est à rapprocher de la figure 3, indique les variations de masse causées par le nettoyage-lavage sur les prototypes ayant participé à la troisième vérification périodique. Ce changement est fonction du nombre d'années qui se sont écoulées depuis le précédent nettoyage-lavage, en général au BIPM. La dispersion des points témoigne en partie de la plus ou moins bonne qualité de la conservation de l'étalon mais très probablement aussi de celle de sa surface et de l'usage qui en a été fait. Cependant, on peut constater la dispersion assez grande entre le prototype international et ses témoins qui ont tous été conservés de la même manière.

L'interprétation de la figure 9 doit être faite avec prudence car certains prototypes ont pu être soumis à un processus de nettoyage autre que celui du BIPM et dont l'effet peut être différent (ce qui impliquerait un déplacement de leur point représentatif sur cette figure). C'est le cas, entre autres, du prototype n° 6 qui n'a pu être porté sur la figure 9 ou des prototypes n°s 4 et 20 (voir figure 3) qui avaient subi un nettoyage et un lavage dans leur laboratoire, un an auparavant.

La troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme a permis de rassembler au BIPM l'étalon national de tous les pays adhérents à la Convention du Mètre qui possèdent au moins un prototype en platine iridié. La masse de chacun d'eux a pu être déterminée, en fonction de celle du prototype international, avec une incertitude composée de 2,3 µg ce qui constituera une bonne base de départ pour les travaux futurs dans le domaine de la masse.

### Remerciements

Je suis reconnaissant à plusieurs personnes de m'avoir aidé, sans eux je n'aurais pu mener à bien cette importante tâche. Ce sont entre autres, P. Carré (informatique), J. Hamon (interférométrie), J.-M. Chartier (laser), J. Hostache (électronique), l'atelier de mécanique. Je voudrais mentionner tout particulièrement Mme M.-J. Coarasa qui a effectué les pesées avant nettoyage-lavage des groupes G3 et G4 et qui, pendant cette troisième vérification périodique, mais aussi depuis de nombreuses années, m'a apporté une aide très précieuse et des avis judicieux. Je remercie aussi M. T. J. Quinn, directeur du BIPM, pour ses conseils et son soutien, ainsi que R. S. Davis, maintenant responsable de la section des masses au BIPM. Je ne voudrais pas manquer de remercier également les membres du NIST (É.-U. d'Amérique) qui ont construit et mis au point dans les années 1960 la balance NBS-2 dont le fonctionnement n'a jamais été pris en défaut et qui a permis de réaliser des pesées d'une très haute qualité.

Septembre 1993

## ANNEXE 1

---

### La balance NBS-2

---

La balance NBS-2 a été étudiée au National Bureau of Standards (aujourd'hui National Institute of Standards and Technology) aux États-Unis d'Amérique et décrite dans [7]. Ce laboratoire en a fait don au BIPM en 1970. Elle a été installée définitivement au sous-sol de l'ancienne salle des balances du BIPM et les premières pesées officielles ont été effectuées en 1973. Cette balance est du type à un seul plateau et deux couteaux. L'étalon de 1 kg déposé sur le plateau est équilibré par un contrepoids en platine iridié (si nécessaire on dispose d'un contrepoids en acier inoxydable). Chaque bras du fléau a une longueur de 5,08 cm. La période d'oscillation est de l'ordre de 37 s. Les couteaux et les plans restent en contact, sous charge, pendant toute la durée de la pesée. Un transporteur, sur lequel peuvent être disposés six étalons de 1 kg, permet de déposer celui que l'on désire sur le plateau. Il est ainsi possible de comparer six étalons (ou moins) dans toutes leurs combinaisons deux à deux. Pratiquement toutes les pesées ont été effectuées en comparant quatre étalons entre eux.

Différentes améliorations ont été apportées à cette balance au cours du temps, dont :

1) l'installation d'une cloche en aluminium de façon à placer cette balance dans une enceinte étanche [8] ;

2) l'amélioration de l'isolation thermique tout en favorisant l'établissement d'une différence de température entre le niveau du plateau et celui du fléau de l'ordre de 0,01 °C [8] ;

3) la mise en place de deux contrepoids pour diminuer les frottements dus aux mouvements de l'ensemble associé au déplacement vertical du transporteur ;

4) l'installation de passages étanches.

Plus récemment, au système de lecture optique des oscillations du fléau installé à l'origine, il a été adjoint un dispositif interférométrique associé à un système de comptage de franges relié à un ordinateur [9]. Les indications envoyées par le compteur de franges sont introduites dans un logiciel spécialement conçu pour ces pesées il y a plusieurs années et qui calcule les masses des différents étalons entrant dans la pesée en fonction de la valeur de la masse de l'étalon de référence.

Pour l'utilisation de cette balance et plus particulièrement au cours de la troisième vérification périodique, on place sur le transporteur six étalons que l'on peut désigner ici par A, B, C, D, E, F, ce qui constitue une *balancée*. Une *pesée* fait intervenir quatre étalons, par exemple A, B, C, D. Les six étalons d'une *balancée* sont comparés par trois pesées :

- 1<sup>re</sup> pesée : étalons A, B, C, D ;
- 2<sup>e</sup> pesée : étalons C, D, E, F ;
- 3<sup>e</sup> pesée : étalons E, F, A, B.

Vers 1982, une étude particulière a fait apparaître que, dans les pesées, la masse d'un étalon inconnu par rapport à celle d'un étalon de référence, pouvait varier de façon significative suivant la position occupée par ces étalons dans le déroulement de la pesée. Une étude approfondie s'en est suivie, ce qui nous a conduit à modifier notre façon de faire [10].

Une pesée comparant les quatre étalons A, B, C et D se déroule par six *sous-pesées*. À ces sous-pesées « *directes* » nous ajoutons maintenant six sous-pesées « *opposées* ». Pour les quatre étalons A, B, C, D on a :

- pesée directe : A et B, B et C, C et D,  
D et A, A et C, B et D ;
- pesée opposée : B et A, C et B, D et C,  
A et D, C et A, D et B.

Les pesées directe et opposée doivent être effectuées dans des conditions aussi voisines que possible, par exemple, deux jours consécutifs selon la même chronologie.

Pour le calcul de la pesée, on applique la méthode des moindres carrés à partir des moyennes des différences entre les positions d'équilibre de chaque sous-pesée directe et opposée.

La comparaison de deux étalons (A et B par exemple), ou *observation* est effectuée par l'intermédiaire du contrepoids. Les positions d'équilibre du fléau qui sont repérées sur une échelle quelconque (échelle optique graduée au début, ou échelon du compteur de franges ensuite) correspondent aux charges suivantes :

- a) étalon A ;
- b) étalon B ;
- c) étalon B + surcharge S ;
- d) étalon A + surcharge S ;
- e) étalon A.

A et B sont échangés pour la pesée opposée.

La surcharge est un petit cavalier de 3 mg, étalonné, qui sert à déterminer la valeur en masse, d'une division de l'échelle utilisée.

La figure 1 donne un exemple de pesée entre quatre prototypes (pesée directe et pesée opposée) ainsi que le calcul, par la méthode des moindres

carrés, de la masse des trois prototypes inconnus en fonction de la masse du prototype de référence. Le résultat non compensé des observations entre ces quatre prototypes est ensuite associé à ceux des autres observations entre tous les prototypes d'un même groupe.

PESÉE À LA BALANCE NBS-2						
Registre :		5 Mars 1991			(8 h 20-10 h 54)	
R10-51						
Kilogrammes	[8(41)]	[21]	[36]	[37]		
Thermomètre : RE2		Résistance étalon : 225350				
Pont : F17A	Temp. R. étalon : 20,5 °C			Corr. j. pression : 781 Pa		
<b>Sous-pesées</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>B + S</b>	<b>A + S</b>	<b>A</b>	<b>A - B</b>
1	7 468	8 842	27 362	25 899	7 501	- 1 418,1
2	8 193	7 339	25 798	26 601	8 265	828,2
3	8 407	8 105	26 533	26 793	8 473	280,7
4	8 674	8 298	26 728	27 066	8 768	357,2
5	8 091	8 598	27 029	26 435	8 165	- 550,5
6	8 300	7 190	25 532	26 626	8 411	1 102,3
<b>Lect. ASL</b>	<b>Temp. °C</b>	<b>Lect. Press</b>	<b>Pression Pa</b>	<b>Hygr.</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>M. vol. air</b>
1	2,754 831 0	20,378	100 505,0	101 286,0	0,490	0,000 65
2	2,754 835 0	20,378	100 505,0	101 286,0	0,490	0,000 65
3	2,754 841 0	20,379	100 505,0	101 286,0	0,490	0,000 65
4	2,754 848 0	20,380	100 505,0	101 286,0	0,490	0,000 65
5	2,754 857 0	20,381	100 505,0	101 286,0	0,490	0,000 65
6	2,754 867 0	20,382	100 505,0	101 286,0	0,490	0,000 65
	2,754 877 0		100 505,0			
Masse de la surcharge : 3,026 6 mg						
<b>Comparaison</b>	<b>Val. div. (microg)</b>	<b>Diff. (mg)</b>	<b>Obs.-Calc. (mg)</b>	<b>Dérives en mg</b>		
				<b>chg. masse</b>	<b>dépl. surch.</b>	
[21]-[8(41)]	0,163 962	- 0,253 25	0,000 85	- 0,007 33	0,010 04	
[36]-[21]	0,164 512	0,139 49	- 0,001 38	- 0,004 19	0,010 09	
[37]-[36]	0,164 722	0,056 78	0,003 57	- 0,003 50	0,008 95	
[8(41)]-[37]	0,164 811	0,065 81	0,005 80	- 0,003 25	0,010 94	
[36]-[8(41)]	0,164 932	- 0,108 28	0,004 95	- 0,007 23	0,013 29	
[37]-[21]	0,165 586	0,196 30	0,002 23	- 0,001 36	0,010 51	
Contrainte n° 1		[8(41)] = 0,300 0 mg (valeur du fichier)				
		→ Différences : pesée « directe »				
<b>RÉSULTAT DE LA PESÉE</b>						
<b>Masses</b>	<b>Val. nom. (mg)</b>	<b>Excès (mg)</b>	<b>Écart-type (mg)</b>			
[8(41)]	1 000 000	0,300 00	0,000 00			
[21]	1 000 000	0,045 91	0,003 61			
[36]	1 000 000	0,186 77	0,003 61			
[37]	1 000 000	0,239 98	0,003 61			
Écart-type de la sous-pesée : 0,005 11 mg						
Cette pesée est stockée sous le nom PES/91-63 sur le disque BNBSO4 et traitée avec le fichier R10-50 enregistré PRE/91-59.						

Fig. 1 (a). — Exemple d'impression du fichier d'une pesée « directe ». Le premier bloc de données indique les références des kilogrammes prototypes et de l'équipement utilisés, le deuxième les lectures de la balance en divisions de l'échelle utilisée, et le troisième les lectures relatives aux conditions de chaque pesée. Ces données sont suivies des différences de masse observées et du résultat de la pesée.

PESÉE À LA BALANCE NBS-2							
Registre : R10-52		6 Mars 1991		(9 h 09-12 h 28)			
Kilogrammes	[8(41)]	[21]	[36]	[37]			
Thermomètre : RE2	Résistance étalon : 225350						
Pont : F17A	Temp. R. étalon : 20,5 °C		Corr. j. pression : 781 Pa				
<b>Sous-pesées</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>A + S</b>	<b>B + S</b>	<b>B</b>	<b>B - A</b>	
1	8 827	7 406	25 989	27 358	8 827	1 394,7	
2	7 147	7 896	26 281	25 440	7 236	- 795,1	
3	8 089	8 277	26 796	26 538	8 169	- 222,8	
4	8 305	8 574	27 046	26 722	8 382	- 296,2	
5	8 593	7 976	26 359	26 971	8 650	614,1	
6	7 137	8 129	26 594	25 492	7 245	- 1 047,0	
Lect. ASL	Temp. °C	Lect. Press	Pression Pa	Hygr.	CO <sub>2</sub>	M. vol. air	
1	2,754 857 0	20,381	100 497,0	101 278,0	0,490	0,000 65	1,197 25
	2,754 861 0		100 497,0				
2	2,754 914 0	20,387	100 497,0	101 277,5	0,490	0,000 65	1,197 22
	2,754 925 0		100 496,0				
3	2,754 872 0	20,382	100 496,0	101 277,0	0,490	0,000 65	1,197 23
	2,754 881 0	20,383	100 496,0	101 277,0	0,490	0,000 65	1,197 23
4	2,754 891 0	20,384	100 496,0	101 277,5	0,490	0,000 65	1,197 23
5	2,754 902 0	20,385	100 497,0	101 278,0	0,490	0,000 65	1,197 23
6	2,754 914 0		100 497,0				
Masse de la surcharge : 3,026 6 mg							
Comparaison	Val. div. (microg)	Diff. (mg)	Obs.-Calc. (mg)	Dérives en mg			
				chgt. masse	déplt. surch.		
[8(41)]-[21]	0,163 097	0,248 20	0,000 20	- 0,004 20	0,004 21		
[21]-[36]	0,165 434	- 0,134 77	- 0,000 20	- 0,007 66	0,015 00		
[36]-[37]	0,164 094	- 0,047 10	0,005 14	- 0,005 80	0,012 31		
[37]-[8(41)]	0,164 433	- 0,055 66	0,005 54	- 0,004 57	0,010 85		
[8(41)]-[36]	0,164 918	0,118 77	0,005 34	- 0,000 48	0,005 15		
[21]-[37]	0,164 886	- 0,186 41	0,000 40	- 0,009 10	0,018 03		
Contrainte n° 1	[8(41)] = 0,300 0 mg (valeur du fichier)			Différences : pesée « opposée »			
RÉSULTAT DE LA PESÉE							
Masses	Val. nom. (mg)	Excès (mg)	Écart-type (mg)				
[8(41)]	1 000 000	0,300 00	0,000 00				
[21]	1 000 000	0,052 00	0,003 78				
[36]	1 000 000	0,186 57	0,003 78				
[37]	1 000 000	0,238 81	0,003 78				
Écart-type de la sous-pesée : 0,005 35 mg							
Cette pesée est stockée sous le nom PES/91-65 sur le disque BNBSO4 et traitée avec le fichier R10-50 enregistré PRE/91-59.							

Fig. 1 (b). — La pesée « opposée » correspondant à la pesée « directe » mentionnée précédemment figure 1 (a).

5/6 mars 1991

Comparaison des prototypes nationaux (Groupe 2)

Liste des étalons : 8(41) 21 36 37

Contrainte

8(41) = 0,321 54

Observations		Val. observ.	Val. calc.	Écart
8(41)-21	=	0,250 73	0,251 05	- 0,000 32
21-36	=	- 0,137 13	- 0,137 72	0,000 59
36-37	=	- 0,051 94	- 0,052 72	0,000 78
37-8(41)	=	- 0,060 74	- 0,060 61	- 0,000 13
8(41)-36	=	0,113 53	0,113 33	0,000 20
21-37	=	- 0,191 36	- 0,190 44	- 0,000 91
Écart-type d'une observation				0,000 81

Masses des étalons et écarts-types

8(41)	:	0,321 54	0,000 00
21	:	0,070 49	0,000 57
36	:	0,208 21	0,000 57
37	:	0,260 93	0,000 57

moyennes : pesée « directe »  
et « opposée »

Équations normales

3	-1	-1	-1	1	0,424 99
-1	3	-1	-1	0	- 0,579 21
-1	-1	3	-1	0	- 0,028 34
-1	-1	-1	3	0	0,182 56
1	0	0	0	0	0,321 54

Variance et covariances réduites (multipliées par 1 000)

0	0	0	0
0	500	250	250
0	250	500	250
0	250	250	500

Observations et contraintes enregistrées dans le fichier R10-51/52 du disque FIMAO2.

Fig. 1 (c). — Différences de masse calculées par la méthode des moindres carrés à partir des moyennes de chacune des sous-pesées des figures 1 (a) et 1 (b); la contrainte correspond à la valeur provisoire du prototype n° 8(41). Ces valeurs sont suivies des excès, par rapport à 1 kg, de la masse des prototypes comparés, excès exprimés en milligramme, et des incertitudes associées.



5 mars/25 avril 1991

Comparaison des prototypes nationaux (Groupe 2)

Liste des étalons : 8(41) 21 36 37 38 40 44 53 54 32 60 65

Contrainte		moyennes des pesées des 5/6 mars 1991		
	=	0,321 54		
Observations		Val. observ.	Val. calc.	Écart
8(41)-21	=	0,250 73	0,250 50	0,000 23
21-36	=	- 0,137 13	- 0,138 19	0,001 06
36-37	=	- 0,051 94	- 0,051 80	- 0,000 14
37-8(41)	=	- 0,060 74	- 0,060 50	- 0,000 23
8(41)-36	=	0,113 53	0,112 31	0,001 22
21-37	=	- 0,191 36	- 0,189 99	- 0,001 36
36-37	=	- 0,051 62	- 0,051 80	0,000 19
37-38	=	0,017 14	0,016 34	0,000 80
38-40	=	0,277 46	0,272 22	0,001 23
40-36	=	- 0,241 06	- 0,240 76	- 0,000 30
36-38	=	- 0,035 08	- 0,035 46	0,000 38
37-40	=	0,291 96	0,292 56	- 0,000 60
38-40	=	0,277 27	0,276 22	0,001 05
40-8(41)	=	- 0,353 08	- 0,353 06	- 0,000 01
8(41)-21	=	0,252 03	0,250 50	0,001 53
21-38	=	- 0,175 18	- 0,173 65	- 0,001 52
38-8(41)	=	- 0,075 46	- 0,076 84	0,001 38
40-21	=	- 0,103 60	- 0,102 57	- 0,001 03
44-53	=	0,165 65	0,165 60	0,000 05
53-54	=	- 0,080 50	- 0,081 67	0,001 17
54-32	=	0,066 87	0,067 33	- 0,000 46
32-44	=	- 0,151 89	- 0,151 26	- 0,000 62
44-54	=	0,084 07	0,083 93	0,000 14
53-32	=	- 0,013 79	- 0,014 34	0,000 55
54-32	=	0,066 95	0,067 33	- 0,000 38
32-60	=	- 0,158 96	- 0,159 72	0,000 76
60-65	=	0,087 09	0,087 14	- 0,000 06
65-54	=	0,006 32	0,005 25	0,001 07
54-60	=	- 0,095 05	- 0,092 39	- 0,002 66
32-65	=	- 0,074 00	- 0,072 58	- 0,001 42
60-65	=	0,086 58	0,087 14	- 0,000 56
65-44	=	- 0,077 86	- 0,078 69	0,000 83
44-53	=	0,166 33	0,165 60	0,000 73
53-60	=	- 0,173 64	- 0,174 06	0,000 42
60-44	=	0,010 07	0,008 46	0,001 61
65-53	=	0,087 72	0,086 91	0,000 81
...				

Fig. 1 (d). — Début de la liste des résultats pour les prototypes du groupe G2 commençant par les valeurs données précédemment dans la figure 1 (c).

## ANNEXE 2

---

### Correction de poussée de l'air

---

Au cours des comparaisons de la troisième vérification périodique, il a été nécessaire d'appliquer une correction de poussée de l'air. Celle-ci est calculée à partir de la température, de la pression atmosphérique, de l'humidité et de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'air ainsi que du volume des étalons, à l'aide de la « Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981) » [5].

Le récepteur thermique est une sonde Rosemount de 25 Ω; sa résistance est mesurée à l'aide d'un pont de résistance Automatic Systems Laboratories (ASL, modèle F17A), où le dernier digit représente 0,1 mK. La résistance de cette sonde a été comparée à celle d'un thermomètre à résistance à tige de fabrication Tinsley à la température ambiante en 1991 et montre une excellente stabilité dans le temps.

La pression atmosphérique à l'intérieur de l'enceinte est mesurée à l'aide d'une jauge Garrett de type absolu ayant un domaine de mesure compris entre zéro et 120 000 Pa, avec une précision de 1 Pa. Le capteur en quartz est de type capacitif. Cette jauge a été comparée tous les un à deux mois au manobaromètre interférentiel du BIPM [11] avec une incertitude de l'ordre de 0,2 Pa. Entre deux comparaisons on peut considérer que la pression atmosphérique à l'intérieur de l'enceinte était connue à environ 2 Pa.

L'humidité est mesurée avec un capteur résistif au chlorure de lithium associé à un lecteur Hydrodynamics. Il a été comparé à un hygromètre EG & G à point de rosée par une circulation d'air en circuit fermé à l'intérieur de l'enceinte, à quatre reprises au cours de la vérification périodique. L'incertitude sur l'humidité était probablement un peu inférieure à 0,01.

La teneur en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est mesurée après préparation de chaque *balancée*, par prélèvement de l'air, au niveau du plateau de la balance, avant la fermeture de l'enceinte. Cette mesure est effectuée avec un analyseur infrarouge Lira 3000 de chez MSA. Le gaz étalon était un mélange d'azote contenant  $900 \times 10^{-6}$  de CO<sub>2</sub> pour une capacité de  $1000 \times 10^{-6}$  de l'appareil.

Le volume utilisé pour chaque prototype était celui déterminé à son origine. La différence maximale de volume entre deux étalons participant à la troisième vérification périodique était de l'ordre de 0,12 cm<sup>3</sup>.

Au cours de la troisième vérification périodique,

— la température est restée comprise entre 20,2 °C et 21,2 °C ;

— la pression atmosphérique a pu être maintenue très près de la pression atmosphérique normale (entre 101 260 Pa et 101 500 Pa) grâce à un dispositif utilisé au moment de la fermeture de l'enceinte de la balance ;

— l'humidité, étant réglée dans la salle des balances, a pu être maintenue entre 0,45 et 0,54 environ ;

— la teneur en dioxyde de carbone est restée comprise entre 0,000 55 et 0,000 75.

Si l'on ne veut pas avoir une incertitude supérieure à 0,2 µg sur la correction de poussée de l'air, étant donnée la différence maximale de volume de 0,12 cm<sup>3</sup>, il faut que la masse volumique de l'air soit connue avec une incertitude relative d'environ  $1 \times 10^{-3}$ , ce qui est largement réalisé.

L'utilisation de la « Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981) » ou de celle de (1981/91) n'entraîne donc aucune erreur significative sur les corrections de poussée de l'air.

## ANNEXE 3

---

### Fabrication des prototypes en platine iridié

---

Dans les deux publications rendant compte de la comparaison initiale des quarante premiers prototypes en platine iridié entre eux et au prototype international du kilogramme [13], ainsi que de la deuxième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme [1], il est donné un certain nombre d'indications sur les propriétés physiques (composition de l'alliage, masse volumique) des prototypes n<sup>os</sup> 1 à 61.

Je voudrais ici donner ces mêmes renseignements pour les prototypes fabriqués depuis près de vingt ans (prototypes n<sup>os</sup> 62 à 80). Ces données peuvent être utiles à la communauté métrologique intéressée par le domaine de la masse. Le terme « prototype » concerne les étalons en platine iridié étudiés à leur origine au BIPM et dont la masse de 1 kg est ajustée dans la limite de 1 mg. La liste de ces « prototypes » comporte les numéros 1 à 80 (septembre 1993).

#### Alliage de platine iridié — réalisation des prototypes

C'est la société Johnson-Matthey Ltd. à Londres (Royaume-Uni) qui a été chargée de l'élaboration des lingots successifs. L'alliage constituant les prototypes contient 90 % de platine et 10 % d'iridium mais aussi d'autres métaux en faible quantité. Lors de la fabrication de chaque lingot des analyses spectrographique et chimique de l'alliage sont pratiquées, ainsi qu'une radiographie par rayons gamma pour vérifier l'absence de cavités.

Les prototypes mentionnés dans les paragraphes suivants ont été tirés du même lingot dans l'année indiquée\* :

Les prototypes n<sup>os</sup> 62 et 63, en 1972 ;

Les prototypes n<sup>os</sup> 65 à 67 et les étalons n<sup>os</sup> 650 et 651, en 1979 ;

Les prototypes n<sup>os</sup> 68 à 73 et l'étalon n<sup>o</sup> 690, en 1981 ;

Les prototypes n<sup>os</sup> 74 à 80, en 1986.

Les étalons n<sup>os</sup> 650, 651, 690 et 691 sont des étalons dont la masse est descendue au-dessous de la tolérance (1 kg – 1 mg) au cours de leur ajustage. L'étalon n<sup>o</sup> 651 a été cédé au National Physical Laboratory (Royaume-Uni) en échange d'une ébauche en platine iridié fabriquée par Englehard au Royaume-Uni dont il a été tiré l'étalon n<sup>o</sup> 691.

Le tableau IV donne la composition de chacun de ces lingots.

TABLEAU IV

Composition de l'alliage des prototypes en platine iridié n<sup>o</sup> 62 à n<sup>o</sup> 80

n <sup>os</sup>	62-63	64	65-66-67 650-651	68 à 73 690	74 à 80
composant	fraction massique × 10 <sup>6</sup>				
Iridium	98 700	100 400	97 000	97 500	99 600
Palladium	70	7	10	20	20
Rhodium	50	20	300	50	70
Argent	10	30	10	10	2
Bore	10	6			1
Calcium	1	2	< 1	< 1	< 1
Cuivre	20	6	50	100	20
Fer	50	10	100	200	20
Magnésium	1	< 1	< 1	< 1	< 10
Manganèse			< 1		
Nickel	20		20	20	10
Or	30	10	< 1	20	10
Plomb	3				
Silicium	30	8	10		20
Platine	le reste				

\* Je voudrais indiquer ci-dessous, pour les prototypes plus anciens, la même information, qui n'a pas été mentionnée dans les publications antérieures :

Les prototypes n<sup>os</sup> 41 et 42, en 1928 ;

Les prototypes n<sup>os</sup> 43, 44 et 47, en 1938 ;

Les prototypes n<sup>os</sup> 45, 46 et 48, en 1938 ;

Les prototypes n<sup>os</sup> 49 et 50, en 1949 ;

Les prototypes n<sup>os</sup> 60 et 61 et l'étalon E59 (voir l'Annexe 4 pour ce dernier), en 1963.

Le procédé de fabrication des lingots ayant servi à la réalisation des prototypes n<sup>os</sup> 62 à 64 a été le même que celui décrit par A. Bonhoure [14]. Les lingots suivants ont été fabriqués suivant une nouvelle méthode [12].

Les ébauches provenant des lingots sont amenées à une masse de 1 kg plus quelques dizaines de grammes. La masse volumique de l'alliage est ensuite déterminée au BIPM sur chaque ébauche. La finition (polissage et ajustage) des étalons n<sup>os</sup> 62 et 63 a été réalisée à l'aide de pâtes à base de poudre de diamant dont les grains sont de plus en plus petits. Tous les prototypes dont les numéros sont compris entre 64 et 80 ont été réalisés (usinés, polis et ajustés) à l'aide d'un outil à pointe de diamant [12].

### Détermination de la masse volumique

La masse volumique de l'alliage est déterminée sur chaque ébauche par la méthode hydrostatique en utilisant l'eau comme étalon de référence. L'eau dite « du robinet » au BIPM est bidistillée. On lui admet une masse volumique à 4 °C égale à 999,972 kg·m<sup>-3</sup> et sa dilatation thermique, celle donnée par Chappuis [15].

L'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC) avait, en 1976, recommandé l'utilisation d'une table de masse volumique du Standard Mean Ocean Water (SMOW) [16]. Dans cette table, la masse volumique à 4 °C était admise comme 999,975 kg·m<sup>-3</sup> et la dilatation une moyenne pondérée proposée par Bigg [17]. La masse volumique de l'eau du robinet bidistillée au BIPM est plus légère que celle du SMOW d'environ 0,003 kg·m<sup>-3</sup> et donc admise égale à 999,972 kg·m<sup>-3</sup> [18]. Par souci de continuité et d'homogénéité, la table de dilatation de l'eau de Chappuis a été conservée. Lorsqu'une nouvelle table de la masse volumique de l'eau sera établie par le Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM), il sera ainsi facile de transformer les valeurs des masses volumiques (ou volumes).

Depuis 1980 (prototype n<sup>o</sup> 65) on tient compte, au BIPM, de la quantité de gaz dissous contenue dans l'eau au moment des pesées. La différence de masse volumique entre une eau saturée en gaz atmosphériques dissous et celle dégazée en fonction de la température de l'eau a été étudiée par plusieurs chercheurs [19]. Une étude faite au BIPM en 1981 [20] a montré que cet effet de gaz atmosphériques dissous dans l'eau variait linéairement en fonction du taux de saturation, à une température donnée.

Telles qu'étaient conduites les déterminations de masse volumique au BIPM jusqu'en septembre 1993, on admettait que la quantité de gaz atmosphériques dissous, à la température des pesées (22 °C environ), était de l'ordre de 0,6 fois la saturation.

Le tableau V donne les valeurs des masses volumiques des prototypes et étalons en platine iridié déterminées depuis 1972 par lingots successifs. On pourra noter la bonne homogénéité des masses volumiques du platine iridié dans chaque lingot.

TABLEAU V





*Masse volumique à 0 °C des prototypes en platine iridié n° 62 à n° 80  
et des étalons n°s 650, 651, 690, 691*

---

n°	Masse volumique/kg·m <sup>-3</sup>
62	21 546,64
63	21 546,68
64	21 555,98
65	21 535,30
66	21 535,27
67	21 535,40
650	21 535,37
651	21 535,15
68	21 544,82
69	21 544,53
70	21 544,57
71	21 545,10
72	21 544,68
73	21 544,62
690	21 544,65
74	21 557,34
75	21 557,23
76	21 557,27
77	21 557,32
78	21 557,33
79	21 557,37
80	21 557,31
691	21 534,38

## ANNEXE 4

### Quelques renseignements sur les prototypes en platine iridié

n°	Renseignements
K1	Témoin de  à partir de 1889 <sup>(a)</sup> .
1	Témoin de  à partir de 1889 <sup>(a)</sup> , réformé en 1925 après une chute, remplacé comme témoin par le n° 7 (non attribué).
2	Attribué à la Roumanie en 1891 (PV* 1891, p. 29).
3	Attribué à l'Espagne en 1889 <sup>(b)</sup> .
4	Attribué aux États-Unis d'Amérique en 1889 <sup>(b)</sup> .
5	Attribué à l'Italie en 1889 <sup>(b)</sup> .
6	Attribué au Japon en 1889 <sup>(b)</sup> .
7	Témoin de  depuis 1925 (PV 1925, p. 62 ; 7 <sup>e</sup> CGPM <sup>+</sup> , 1927, p. 79).
8(41)	Porte le n° 41 et ses accessoires le n° 8. Puisqu'il n'y a pas de prototype marqué 8 on nomme celui-ci 8(41). Témoin de  en 1905 (PV 1905, p. 110 ; 4 <sup>e</sup> CGPM, 1907, p. 37).
9	Attribué au BIPM en 1889 <sup>(b)</sup> . Chute dans la balance Bunge en septembre 1949 (PV 1950, p. 32).
10	Attribué au Portugal en 1889 <sup>(b)</sup> .
11	Attribué à la Serbie en 1889 <sup>(b)</sup> , endommagé en 1907 et remplacé en 1925 par le n° 29 appartenant auparavant au Conservatoire national des arts et métiers, Paris, France (PV 1925, p. 15 et p. 82).
12	Attribué à la Russie en 1889 <sup>(b)</sup> .
13	Attribué à la France en 1889 <sup>(b)</sup> .
14	Attribué à l'Autriche en 1889 <sup>(b)</sup> .
15	Attribué à la Bavière en 1889 <sup>(b)</sup> .
16	Attribué à la Hongrie en 1889 <sup>(b)</sup> .



- 17 Attribué à la France en 1889<sup>(b)</sup>, détenu par l'Administration des Monnaies, puis par le Service des instruments de mesure (PV 1952, p. 46). En 1993, il est déposé au Département métrologie et qualité à Ivry-sur-Seine, dépendant de l'École des mines de Douai (France).
- 18 Attribué à la Grande-Bretagne en 1889<sup>(b)</sup>.
- 19 Attribué à l'Italie en 1889<sup>(b)</sup>.
- 20 Attribué aux États-Unis d'Amérique en 1889<sup>(b)</sup>.
- 21 Attribué au Mexique en 1891 (PV 1891, p. 28).
- 22 Attribué à l'Allemagne en 1889<sup>(b)</sup>, accidenté en 1944 à Berlin.
- 23 Attribué à la Finlande en 1890 (PV 1890, p. 52).
- 24 Attribué à l'Espagne en 1889<sup>(b)</sup>.
- 25 Attribué à la France en 1889<sup>(b)</sup>, détenu par l'Observatoire de Paris jusqu'en 1958, époque à laquelle il a été acheté par le BIPM (PV 1958, p. 19).
- 26 Attribué à l'Académie de Saint-Pétersbourg (Russie) en 1889<sup>(b)</sup>.
- 27 Attribué au Danemark en 1889<sup>(b)</sup>, réformé en 1946, remplacé par le n° 48 en 1949 (PV 1950, p. 16).
- 28 Attribué à la Belgique en 1889<sup>(b)</sup>.
- 29 Appartenant au Conservatoire national des arts et métiers, Paris, France jusqu'en 1925, puis au Royaume des Serbes, Croates et Slovènes en remplacement du n° 11, accidenté (PV 1925, p. 15).
- 30 Attribué au Japon en 1894 (PV 1894, p. 91).
- 31 Attribué au BIPM en 1889<sup>(b)</sup>. Chute dans la balance Bunge en février 1951 (PV 1952, p. 45).
- 32 Témoin de ~~8~~ en 1905 (PV 1905, p. 110 ; 4° CGPM, 1907, p. 37).
- 33 Attribué à l'Autriche en 1889<sup>(b)</sup>.
- 34 Attribué à la France en 1889<sup>(b)</sup>, détenu par l'Académie des sciences de Paris.
- 35 Attribué à la France en 1889<sup>(b)</sup>.
- 36 Attribué à la Norvège en 1889<sup>(b)</sup>.
- 37 Attribué à la Belgique en 1889<sup>(b)</sup>.
- 38 Attribué à la Suisse en 1889<sup>(b)</sup>.
- 39 Attribué au Japon en 1894 (PV 1894, p. 91). Il a été cédé en 1958 à la République de Corée après la seconde guerre mondiale.
- 40 Attribué à la Suède en 1889<sup>(b)</sup>.

- 41 Attribué à la Tchécoslovaquie en 1929 (8<sup>e</sup> CGPM, 1933, p. 38) ; appartenant à la République slovaque depuis 1993.
- 42 Attribué à la Turquie en 1935 (PV 1935, p. 26), réformé en 1953 (PV 1954, p. 22) et échangé contre le n<sup>o</sup> 54. Le n<sup>o</sup> 42 a été conservé par le BIPM ; il est maintenant accompagné d'une surcharge et connu sous le n<sup>o</sup> 42'.
- 43 Témoin de  $\text{K}$  en 1939 (PV 1939, p. D 10).
- 44 Attribué à l'Australie en 1947 (PV 1948, p. 30).
- 45 Attribué à l'Argentine en 1939 (PV 1939, p. D 11) ; perdu en 1986.
- 46 Attribué aux Indes néerlandaises en 1939 (PV 1939, p. D 11) devenues l'Indonésie.
- 47 Témoin de  $\text{K}$  en 1939 (PV 1939, p. D 10).
- 48 Attribué au Danemark en 1949 en remplacement du n<sup>o</sup> 27 (PV 1950, p. 16).
- 49 Attribué à l'Autriche en 1951 (PV 1952, p. 30).
- 50 Attribué au Canada en 1951 (PV 1952, p. 30).
- 51 Attribué à la Pologne en 1952 (PV 1952, p. 30).
- 52 Attribué à l'Allemagne en 1954 (PV 1954, p. 22).
- 53 Attribué aux Pays-Bas en 1953 (PV 1954, p. 22).
- 54 Attribué à la Turquie en 1953 (PV 1954, p. 22) en remplacement du n<sup>o</sup> 42.
- 55 Attribué à l'Allemagne en 1954 (PV 1956, p. 45) ; appartenant à la République fédérale d'Allemagne, depuis la réunification en 1990.
- 56 Attribué à l'Afrique du Sud en 1955 (PV 1956, p. 25).
- 57 Attribué à l'Inde en 1958 (PV 1958, p. 19).
- 58 Attribué à la République arabe unie en 1963 (PV 1964, p. 44), appartenant maintenant à la République arabe d'Égypte.
- 59 Cet étalon a été acheté par le National Research Laboratory of Metrology (Japon) à Stanton Instruments (Royaume-Uni) en 1963. C'est par erreur qu'il a été inclus dans la liste des prototypes en platine iridié. Au NRLM il porte le n<sup>o</sup> E59.
- 60 Attribué à la République populaire de Chine en 1963 (PV 1965, p. 39).
- 61 Attribué à la République populaire de Chine en 1963 (PV 1965, p. 39) ; réformé en 1978 et remplacé par le n<sup>o</sup> 64.
- 62 Appartenant à l'Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Turin, Italie, depuis 1974 (PV 1974, p. 41).

- 63 Appartenant au BIPM depuis 1974.  
(Les prototypes n° 62 et n° 63 sont les deux seuls prototypes polis et ajustés à l'aide de pâte à base de poudre de diamant.)
- 64 Attribué à la République populaire de Chine en 1983 (PV 1984, p. 50). C'est le premier prototype usiné, poli et ajusté à l'aide d'un outil à pointe de diamant.
- 65 Attribué à la Tchécoslovaquie en 1981 (PV 1982, p. 36) ; il appartient à la République slovaque depuis 1993.
- 66 Attribué au Brésil en 1983 (PV 1984, p. 50).
- 67 Appartenant au BIPM depuis 1983 (PV 1984, p. 50).
- 68 Attribué à la République populaire démocratique de Corée en 1987 (PV 1987, p. 37).
- 69 Attribué au Portugal en 1987 (PV 1987, p. 37).
- 70 Attribué à la République fédérale d'Allemagne en 1987 (PV 1987, p. 37).
- 71 Attribué à Israël en 1987<sup>(c)</sup>.
- 72 Attribué à la République de Corée en 1989<sup>(c)</sup>.
- 73 Appartenant au BIPM depuis 1988<sup>(c)</sup>.
- 74 Attribué au Canada en 1989<sup>(c)</sup>.
- 75 Appartenant au Hong Kong Government Standards and Calibration Laboratory, Hong Kong depuis 1992<sup>(c)</sup>.
- 76 Appartenant à l'Istituto di Metrologia G. Colonnetti depuis 1993 (PV 1994, à paraître).
- 77 Appartenant au BIPM depuis 1992<sup>(c)</sup>.
- 78 Non attribué.
- 79 Non attribué.
- 80 Non attribué.

---

\* PV : abréviation de *Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*.

+ CGPM : abréviation de *Comptes Rendus Conf. gén. poids et mesures*.

(a) 1<sup>re</sup> CGPM, 1889, p. 48.

(b) 1<sup>re</sup> CGPM, 1889, p. 40.

(c) distribués après la 3<sup>e</sup> vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme, en 1993.

BIBLIOGRAPHIE

1. BONHOURS A., *BIPM Travaux et Mémoires*, 1966, **22**, C1-C71.
  2. *BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1986, **54**, 56-58.
  3. *BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1989, **57**, 15-16.
  4. GIRARD G., Le nettoyage-lavage des prototypes du kilogramme au BIPM, BIPM 1990, 19 pages.
  5. GIACOMO P., *Metrologia*, 1982, **18**, 33-40.
  6. DAVIS R. S., *Metrologia*, 1992, **29**, 67-70.
  7. ALMER H. E., *J. Res. N.B.S.*, 1972, **76C**, 1-10.
  8. *BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1974, **42**, 37-40.
  9. *BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1988, **56**, 59-61.
  10. *BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1983, **51**, 40-43.  
CARRÉ P., DAVIS R. S., *J. Res. N.B.S.*, 1985, **90**, 331-339.
  11. BONHOURS J., TERRIEN J., *Metrologia*, 1968, **4**, 59-68 et 148.
  12. QUINN T. J., *Platinum Metals Review*, Johnson Matthey, 1986, **30**, 74-79.  
*BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1981, **49**, 40-43.
  13. TORNOË H., *BIPM Travaux et Mémoires*, 1890, **7**, 1-9.  
THIESEN M., *BIPM Travaux et Mémoires*, 1898, **9**, 3-21, B3-B48, C3-C48.
  14. BONHOURS A., *Microtecnic*, 1952, **VI**, 204-206.
  15. CHAPPUIS P., *BIPM Travaux et Mémoires*, 1907, **13**, D1-D41.
  16. IUPAC Commission I.4, Recommendation for Redetermination of the Absolute Density of Water, *Pure and Appl. Chem.*, 1976, **45**, 1-9.
  17. BIGG P. H., *Brit. J. Appl. Phys.*, 1967, **18**, 521-525.
  18. GIRARD G., MENACHÉ M., *C. R. Acad. Sci.*, Paris, 1972, **274**, Série B, 377-379.  
MENACHÉ M., BEAUVERGER C., GIRARD G., *Annales Hydrographiques*, Paris, 1978, **6**, N° 750, 37-76.
  19. BIGNELL N., *Metrologia*, 1983, **19**, 57-59.
  20. GIRARD G., COARASA M.-J., *Proc. Conf. Precise Measurement Fundamental Constants II*, 1981, *NBS Special Pub.* **617**, 1984, 453-459.
-





# **COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES**

## **REPORT OF THE MEETING**

### **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 the BIPM is to ensure worldwide unification of physical measurements; it is responsible for:

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

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

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

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

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

The activities of the 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 of electricity (1927), photometry (1937), ionizing radiations (1960), to time scales (1988) and to amount of substance (1993). 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.

Some forty physicists or technicians work in the BIPM laboratories. They mainly conduct metrological research, international comparisons of realizations of units and the verification of standards used in the above-mentioned areas. An annual report published

---

\* As of 31 December 1993, forty-seven States were members of this Convention: Argentina (Rep. of), Australia, Austria, Belgium, Brazil, Bulgaria, Cameroon, Canada, Chile, China (People's Rep. of), Czech Republic, 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, Russian Federation, Spain, Slovak Republic, South Africa, Sweden, Switzerland, Thailand, Turkey, United Kingdom, U.S.A., Uruguay, Venezuela.

in the Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures gives the details of the work in progress.

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

The Comités Consultatifs have common regulations (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1963, 31, 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 nine 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 (CCP) 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 was 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.
9. The Comité Consultatif pour la Quantité de Matière (CCQM), set up in 1993.

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 the CIPM.

Since 1965 the international journal *Metrologia*, edited under the auspices of the 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.

---

MEMBERS  
OF THE  
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

on 21 September 1993

*President*

1. D. KIND, President, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 3300 Braunschweig, Germany.

*Secretary*

2. J. KOVALEVSKY, Astronomer, Observatoire de la Côte d'Azur, avenue N. Copernic, 06130 Grasse, France.

*Members*

3. W.R. BLEVIN, Chief of the Division of Applied Physics, CSIRO, P.O. Box 218, Bradfield Road, Lindfield NSW 2070, Australia. *Vice-President.*
4. J. DE BOER, Institute of Physics, University of Amsterdam, Valckenierstraat 65, Amsterdam-C, Netherlands.
5. P.B. CLAPHAM, Director, National Physical Laboratory, Teddington TW11 0LW, United Kingdom.
6. L. CROVINI, Director, Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Strada delle Cacce 73, 10135 Turin, Italy.
7. GAO Jie, Acting Director, Joint Laboratory of High Technology Metrology and Measurement, State Bureau of Technical Supervision, BP 2112, Beijing 100088, People's Republic of China.
8. E.S.R. GOPAL, Director, National Physical Laboratory of India, Dr K.S. Krishnan Road, New Delhi 110012, India.
9. K. IZUKA, c/o National Research Laboratory of Metrology, 1-1-4 Umezono, Tsukuba 305, Japan.
10. O.V. LOUNASMAA, Low Temperature Laboratory, Helsinki University of Technology, SF-02150 Espoo, Finland.

11. J.W. LYONS, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, USA.
12. P. PÂQUET, Director, Observatoire Royal de Belgique, 3 avenue Circulaire, B-1180 Brussels, Belgium.
13. T. PLEBANSKI, Chairman, Committee on Metrology and Scientific Instrumentation, Polish Academy of Sciences, Palac Kultury i Nauki, Office No. 2321, P.O. Box 24, 00901 Warsaw, Poland.
14. V.I. POUSTOVOIT, Vice-President, GOSSTANDART, Leninski prosp. 9b, 117049 Moscow, Russian Federation.
15. K. SIEGBAHN, Institute of Physics, University of Uppsala, Box 530, 75121 Uppsala 1, Sweden.
16. J. SKÁKALA, Professor, Slovak Technical University, Nám. Slobody 17, 812 31 Bratislava, Slovak Rep. *Vice-President*.
17. R. STEINBERG, Head, Department of Physics and Metrology, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 1101 Buenos Aires, Argentina.
18. J. VANIER, former Director General, Institute for National Measurement Standards, National Research Council of Canada, Ottawa K1A 0S1, Canada.

*Honorary members*

1. E. AMBLER, The Belvedere (No. 626), 1600 N. Oak Street, Arlington, VA 22209.
  2. L.M. BRANSCOMB, Box 309, Concord, Massachusetts 01742.
  3. J.V. DUNWORTH, The Warbuck, Kirk Michael, Isle of Man.
  4. M. KERSTEN, Am Hohen Tore 4A, 3300 Braunschweig.
  5. F.J. LEHANY, 5 Gladstone Avenue, Hunters Hill, NSW 2110.
  6. H. PRESTON-THOMAS, 1109 Blasdell Avenue, Ottawa K1K 0C1.
-

---

STAFF  
OF THE  
BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

on 1 January 1994

---

Director: Dr T. J. Quinn

*Length:* Mr J.-M. Chartier

Mr R. Felder, Dr S. Picard, Dr L. Robertsson, Dr L. Vitushkin<sup>(1)</sup>,  
Mr A. Zarka  
Mrs A. Chartier, Mr J. Labot

*Mass and related quantities:* Dr R.S. Davis, Mr A. Sakuma

Mr A. Picard  
Mrs J. Coarasa, Mr J. Hostache  
Mr J. Dias

*Time scales:* Dr C. Thomas

Mr J. Azoubib, Dr W. Lewandowski, Mr G. Petit  
Miss H. Konaté, Mr P. Moussay, Mrs M. Thomas

*Electricity:* Dr T.J. Witt

Mr F. Delahaye, Dr D. Reymann  
Mr D. Avrons, Mr D. Bournaud  
Mr P. Benoit

*Radiometry and photometry:* Dr R. Köhler

Mr R. Goebel  
Mr C. Garreau, Mr F. Lesueur, Mr R. Pello

*Ionizing radiations:* Dr J.W. Müller

Mrs M. Boutillon, Mr P. Bréonce, Dr V.D. Huynh, Dr G. Ratel  
Mr D. Carnet, Mr C. Colas, Mr L. Lafaye, Mr C. Veyradier

*Secretariat:* Miss J. Monprofit

Mrs L. Delfour, Mrs D. Le Coz, Mrs M. Petit

*Metrologia*: Dr D.A. Blackburn

Mrs C. Lawrence

*Finance, administration*: Miss B. Perent

Mrs M.-J. Martin, Mrs D. Saillard

*Caretakers*: Mr and Mrs Dominguez, Mr and Mrs Neves

*Domestic help*: Mrs A. Perez, Mrs R. Prieto, Mrs R. Vara

*Gardeners*: Mr C. Angot, Mr C. Dias-Nunes

*Workshop*: Mr J. Sanjaime

Mr B. Bodson, Mr M. de Carvalho, Mr J.-B. Caucheteux, Mr J.-P. Dewa,  
Mr A. Gama, Mr A. Montbrun, Mr F. Perez, Mr D. Rotrou,  
Mr E. Dominguez<sup>(2)</sup>, Mr C. Neves<sup>(2)</sup>

*Director emeritus*: Prof. P. Giacomo  
*Principal Metrologist emeritus*: Mr G. Leclerc  
*Metrologist emeritus*: Mr H. Moreau

---

(1) Research Fellow

(2) Also caretakers



## AGENDA

---

1. Opening of the meeting by the President; quorum; approval of the agenda.
  2. Report of the Secretary of the Comité (October 1992 - September 1993).
  3. Comités consultatifs :
    - report of the CCDS,
    - report of the CCM,
    - report of the CCT,
    - future meetings.
  4. Work of the BIPM: Report of the Director.
  5. Accreditation and certification of national metrology laboratories.
  6. Metrology in chemistry.
  7. Twentieth Conférence Générale des Poids et Mesures, 1995; preliminary discussion.
  8. Administrative and financial affairs
    - “Rapport aux Gouvernements” for 1992,
    - Quitus for 1992,
    - Progress report on the 1993 exercise,
    - Non-paying members.
  9. Other business.
-



# COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

---

82nd Meeting  
(21-23 September 1993)

---

## PROCEEDINGS OF THE SESSIONS HELD AT SÈVRES

D. Kind, President

---

The Comité International des Poids et Mesures (CIPM) held its 82nd meeting on Tuesday 21, Wednesday 22 and Friday 23 September 1993. In all, four sessions were held.

Present: MESSRS. BLEVIN, CLAPHAM, CROVINI, GAO, GOPAL, IZUKA, KIND, KOVALEVSKY, LOUNASMAA, LYONS, PAQUET, PLEBANSKI, SIEGBAHN, SKÁKALA, STEINBERG, VANIER and QUINN (Director of the BIPM).

Also attending the meeting: Prof GIACOMO (Director Emeritus of the BIPM); Dr TARBHEYEV (invited); Miss MONPROFIT, Mrs LE COZ (Secretariat)

Apologies for absence were received from Professor DE BOER. No message was received from Dr POUSTOVOIT.

### 1. Opening of the meeting; quorum; agenda

The President opened the 82nd meeting of the Comité International des Poids et Mesures and welcomed the members present, in particular the three members recently elected, Messrs. Gao, Gopal and Lounasmaa, and the guests, Professor Giacomo and Dr Tarbeyev.

He thanked the Director and the staff of the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) for their work in preparing for this committee.

One minute of silence was observed in memory of Dr Volet, Director Emeritus of the BIPM, who had died on 5 November 1992 in his ninety-

eighth year. He reminded members of the CIPM that an obituary had been published in the *Procès-Verbaux* of the CIPM for 1992.

He noted that attendance was very high and that the quorum was satisfied, according to Article 12 of the *Convention du Mètre*.

The agenda was adopted.

The President invited the Secretary of the Comité to present his report.

## **2. Report of the Secretary of the CIPM** (October 1992 - September 1993)

Professor Kovalevsky, Secretary of the CIPM, presented the following report:

### *Member States of the Convention du Mètre*

Following the disappearance of the State of Czechoslovakia we were informed on 18 March 1993 by the French Ministère des Affaires Étrangères that both the new Czech and Slovak Republics have joined the Convention du Mètre. Consequently the number of member States is now forty-seven.

We have been informed that the government of Singapore has decided to join the Convention du Mètre and that the instruments of adhesion will soon be sent to the French authorities. We await the official notification.

In discussing future membership of the Convention, it was agreed that the BIPM should encourage, and give whatever support it can, to regional metrology organizations. In this way we can demonstrate the usefulness of the Convention du Mètre in promoting metrology worldwide.

### *Membership of the Comité International*

Since the last meeting of the CIPM two resignations have come into force, those of Professor Wang Daheng and Professor Sala, which together with that of Dr Jensen bring the number of vacancies on the Comité to three. The three vacancies have been filled by the elections of Dr Gao Jie, Professor E.S.R. Gopal and Professor O. Lounasmaa.

### *Meetings of Comités Consultatifs and Working Groups*

— The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS) held its 12th meeting from 24 to 26 March 1993. It was preceded by a meeting of the Working Group on Improvements to TAI on the 22 and 23 March 1993.

— The Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM) held its 5th meeting on Wednesday 9 and Thursday 10 June 1993. It was preceded by meetings of its different working groups.

— Section I of the Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants (CCEMRI) (Rayons x et  $\gamma$ , électrons) held its 11th meeting from 21 to 23 April 1993. Section II of the CCEMRI (Mesure des radionucléides) held its 12th meeting on 1, 2 and 3 June 1993. Section III of the CCEMRI (Mesures neutroniques) held its 10th meeting on 19, 20 and 21 April 1993.

— The Comité Consultatif de Thermométrie (CCT) held its 18th meeting from 7 to 9 September 1993.

### *Financial position of the BIPM and Annual Report for 1992*

The bureau approved the draft Annual Report for 1992 prepared by the Director and received his report on the progress of the 1993 exercise.

The Annual Report shows that overall expenditure in 1992 was 10,9 % below the voted budget and that the net excess of expenditure over income for the year was 397 587 gold francs, equivalent to 1,8 % of the voted budget. This excess of expenditure over income is less than the 1,3 million gold-francs estimated at the time of last year's meeting of the CIPM in September 1992, largely as a result of arrears of payment, amounting to some 1,1 million gold francs, which were received towards the end of the year.

The repartition (*see* Article 6 (1921) of the Rules annexed to the *Convention du Mètre*) of the contributions of seven member States, which is the case in 1993, is unprecedented and is a considerable worry for the future. Efforts have been made by personal contacts and through Embassies to persuade these States to make some contribution.

### *Financial Report*

The Table below shows the situation of the assets of the BIPM, in gold francs, on 1 January of the year noted at the head of each column.

Accounts	1990	1991	1992	1993
I. — Ordinary funds . . . .	10 924 171,95	11 681 069,08	12 431 411,07	12 113 526,07
II. — Pension fund . . . . .	14 002 735,45	14 546 368,84	15 364 041,35	16 395 611,25
III. — Special fund for the improvement of scientific equipment .	75 835,04	75 627,81	172 765,56	171 995,64
IV. — Staff loan fund . . . .	283 545,36	302 431,48	327 514,70	358 173,05
V. — Building reserve fund.	0,00	0,00	0,00	0,00
VI. — Metrologia . . . . .	0,00	0,00	0,00	0,00
VII. — Medical insurance reserve fund . . . . .	0,00	0,00	0,00	728 727,58
Totals . . . . .	25 286 287,80	26 605 497,21	28 295 732,68	29 768 033,59

### *Accreditation and certification of national metrology laboratories*

The bureau discussed the activities of national accreditation and certification bodies insofar as they concern national metrology laboratories. A discussion paper was prepared and presented to the Comité.

### *Metrology in chemistry*

Discussion took place on the role of the CIPM and the BIPM in metrology in chemistry in the light of recent developments elsewhere. A draft document, prepared by Dr Lyons and the Director, was put to the Comité in which a proposal is made for the creation of a Comité Consultatif in this field.

### *Miscellaneous*

The bureau of the Comité met three times during the year, twice at the Pavillon de Breteuil and once at the NPL (Teddington) at the kind invitation of Dr P. B. Clapham.

Brief discussions took place in the bureau on the following subjects :

— Further correspondence with the French Ministère de la Culture on the consequences of their decision to place the Pavillon de Breteuil and the whole of the site of the BIPM on the list of historic monuments. The Director has firmly stated the position of the BIPM in this matter in the light of the Convention du Mètre and the Accord de Siège;

— Terms of reference and membership of the CCDS Working Group on the application of general relativity to metrology. These will be presented to the Comité;

— Various matters related to senior staff promotion and careers;

— A draft item prepared by the Director for publication in *Metrologia* in which the results of bilateral and multi-lateral comparisons are described.

The President thanked the Secretary of the Comité for his report and asked for comments.

Dr Clapham asked Dr Quinn to explain briefly to the new members the role and composition of the bureau of the Comité. Dr Quinn said the bureau is composed of a small group of persons elected by the CIPM (now the President, Secretary, and two Vice-presidents) with the Director of the BIPM. It normally meets three times a year and deals with a wide range of matters concerning the BIPM and the CIPM.

## **3. Comités Consultatifs**

### **3.1 Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde**

Professor Kovalevsky, President of the Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS) presented a brief report on the activities

of the CCDS, which had held its 12th meeting at the Bureau International des Poids et Mesures at Sèvres on 24, 25 and 26 March 1993.

The CCDS meeting was preceded by a meeting of the Working Group on improvements to TAI, which spent two days discussing the scientific aspects of the formation of TAI, the availability of techniques for time comparisons and problems encountered in the various laboratories.

The CCDS reviewed progress in atomic frequency standards and clocks since the previous meeting in 1989. The stability and the mutual correlation between the clocks were examined. The most accurate caesium primary frequency standards are still considered to be CS1 and CS2 at the PTB. New caesium standards are under test at the NIST (NIST-7), at the LPTF and at the NRLM for example, although they are not yet at the same level of accuracy as those at the PTB. Hydrogen masers contribute a weight of about 13 % to TAI. Caesium atomic fountains are giving promising results in France, Japan, the United Kingdom and the USA.

The CIPM then examined the Recommendations of the CCDS.

Recommendation S 1 (1993), on the accuracy of primary frequency standards, was adopted\*, in a shorter and slightly modified form, as Recommendation 1 (CI-1993). The development of new frequency standards continues to be of concern to many laboratories, as they are suffering from budget restrictions that allow little new work to be started.

Recommendation S 2 (1993), on the timing of millisecond pulsars, is directed towards external agencies and is very important for the future. It was adopted by the CIPM as Recommendation 2 (CI-1993).

The CIPM approved Recommendation S 3 (1993), on the international schedule for GLONASS common-view time comparisons, considering it as a topic internal to the BIPM.

Recommendation S 4 (1993), on clock comparison by satellite laser techniques, is directed towards space agencies. It was adopted as Recommendation 3 (CI-1993).

The CIPM also approved Recommendation S 5 (1993), on the need to improve worldwide time coordination to UTC, which in large part is directed towards the BIPM, and Recommendation S 6 (1993), on GPS time transfer coordination, which is a technical recommendation.

A discussion followed on the future roles of GLONASS, which is not affected by Selective Availability (SA), and of GPS. Dr Lyons offered to contact the U.S. Secretary of Defence on behalf of the CIPM and to make

---

\* The CIPM, in examining Recommendations from the Comités Consultatifs, will either *a*) adopt the Recommendation, perhaps with modifications, so that it becomes a CIPM Recommendation, *b*) approve the Recommendation, thus giving positive support to its content but not considering it appropriate for it to become a CIPM Recommendation, *c*) take note of the Recommendation, for those cases where the CIPM does not give its support but does not disapprove strongly of its content or, exceptionally, *d*) take some other action if the CIPM strongly disapproves of its content.

representations on the importance of GPS to the world time community and the difficulties that are presented by SA.

The President thanked Professor Kovalevsky and then asked Dr Iizuka to present his report on the meeting of the Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées.

### **3.2 Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées**

Dr Iizuka, President of the Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM) presented his report on the fifth meeting of CCM held at the BIPM on 9 and 10 June 1993.

The most important topic discussed was the results of the third verification of the national prototypes of the kilogram (*see* page G 35). Certificates have been sent to all participating laboratories in respect of their national prototypes. The certificates give the mass of the prototype just after the final cleaning and washing at the BIPM : an addendum gives the mass of the prototype as it was on arrival at the BIPM. On average, national prototypes show an increase in mass with respect to the international prototype. The CCM adopted the following statement :

The CCM having reviewed a report and the results of the third periodic verification of national prototypes of the kilogram, expresses its satisfaction with the work done and the successful conclusion reached.

Dr Iizuka then reviewed the reports of the working groups of the CCM on mass standards (influence of ambient parameters, cleaning and contamination, international comparison of secondary standards), density (CSIRO report on absolute water density and thermal expansion measurements), force (calibration of large forces) and pressures. He also reported on the meeting of the Balance Club.

Research aimed at a possible new definition of the kilogram was presented, and a discussion took place on the relationship between the CCM and the CCE Working Group on electrical experiments to monitor the kilogram.

Dr Iizuka concluded his report by thanking Mr Girard for the completion of the third verification of the national prototypes of the kilogram.

After discussion, the CIPM adopted Recommendation G 1 (1993), on the need to monitor the stability of the international prototype of the kilogram, as Recommendation 4 (CI-1993).

Dr Crovini raised certain problems encountered with silicon standards and noted the desirability of applying corrections for air buoyancy in their weighings. Dr Lounasmaa said it was urgent to find a new mass standard, considering the alarming problem of contamination of the standards by mercury. Professor Kind, although agreeing in principle on the interest of

studying a new definition of the unit of mass, remarked that the accuracy of the kilogram is not so poor.

Dr Blevin suggested that use be made of the present situation to stress the importance of fundamental physics and modern metrology. The primary standard of mass, whose stability is difficult to attain by other techniques, constitutes an exception to the rule. Dr Quinn agreed, and said that research on the kilogram and on balances has raised considerable interest in the scientific world.

Dr Clapham remarked that it is difficult to convince economists and politicians of the necessity of basic research in metrology. Professor Kind did not have the same impression: he found much support and understanding from those responsible for the budget in his country, as did Dr Iizuka.

The President thanked Dr Iizuka and then asked Dr Crovini to present his report on the meeting of the Comité Consultatif de Thermométrie.

### 3.3 Comité Consultatif de Thermométrie

Dr Crovini, President of the Comité Consultatif de Thermométrie (CCT), presented the report of the 18th meeting of the CCT, held at the BIPM from 7 to 9 September 1993.

As this was the first meeting following the introduction of the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), the CCT began by examining progress in the realization and dissemination of the new scale in the member laboratories of the CCT. The results of a questionnaire show that all member laboratories realize and disseminate the ITS-90 over its middle and upper ranges. Several projects are under way to fill the gaps at low temperatures.

The CCT considered some problems related to the recommended values given in the ITS-90 for  $t_{90} - t_{68}$  in the range from 630 °C to 1064 °C. New measurements, made as part of the preparation of international reference tables for thermocouples, do not agree with the values given in the ITS-90. Most of the difference must be due to the non-uniqueness of the IPTS-68 in this range. The CCT approved the new values and agreed that they should be published in *Metrologia*. A new table of secondary fixed points prepared by Working Group 2 will also be published.

The need for international traceability of temperature measurements was thoroughly examined. Such a task requires close cooperation within and between regional groups, as stated in Recommendation T 1 (1993), on links between regional comparisons of temperature standards.

The CCT recognized the importance of undertaking further experiments to assess the non-uniqueness of the ITS-90 and to study improvements in techniques for realizing the defining fixed points. Particular attention was given to the triple point of water. In Recommendation T 2 (1993), on the

behaviour of triple point of water cells, national laboratories are encouraged to undertake experiments and supply cells to the BIPM.

The CCT then discussed a possible definition for an international temperature scale covering the range between 2 mK and 0,65 K to be based on the  $^3\text{He}$  melting curve. There is consensus among CCT members that such a scale is desirable and that it must join the ITS-90 smoothly. The discussion then turned to the thermodynamic accuracy of the ITS-90 in the light of some new determinations. Recommendation T 3 (1993), on thermodynamic temperature measurements, encourages national laboratories to pursue the measurement of thermodynamic temperature in the regions below 0,65 K, near 150 K, near 700 K, and at higher temperatures, and recommends that the BIPM take advantage of its acquisition of a cryogenic radiometer to contribute to this work.

The CIPM discussed the recommendations of the CCT. It approved Recommendations T 1 and T 2 (1993), and adopted Recommendation T 3 (1993), in a shortened version, as Recommendation 5 (CI-1993).

Professor Siegbahn and Professor Lounasmaa remarked that the fields of low temperature physics and thermodynamics are still very active and that accurate temperature measurements are therefore required. Dr Crovini agreed and said that many physicists work in these fields.

Dr Blevin remarked on the need for reference materials for thermal conductivity. Dr Crovini said that this matter is not one that has been discussed at a CCT meeting. Dr Quinn reminded members that, when created, the CCT dealt with thermometry and calorimetry. The President concluded that the capabilities of the Comités Consultatifs and of the BIPM were limited, and that they should concentrate on properties very close to the SI units.

### 3.4 Future meetings of Comités Consultatifs

The President reminded the Presidents of the Comités Consultatifs that dates had to be set for future meetings. The following were agreed:

CCDM	1995
CCDS	no date for the moment
CCE	no date for the moment
CCEMRI	12-13 April 1994
CCM	June 1996
CCPR	14-16 September 1994
CCT	1996
CCU	no date for the moment.



#### 4. Work of the BIPM: Report of the Director

##### *Work of the BIPM*

Dr Quinn invited the scientific staff of the BIPM to present the work carried out since the last meeting of the CIPM, highlighting the significant features and the objectives of each project. He recalled that a visit to the laboratories was scheduled for the afternoon.

Emphasis was given to the international comparisons carried out by the BIPM (in the framework of regional groups) with a view to providing traceability among standards at the highest level.

The Length section put the accent on the *Mise en pratique* of the definition of the metre, the programme of international comparisons, and on research work to develop new frequency standards suitable as recommended wavelengths.

The Mass section presented the final results of the third periodic verification of the national prototypes of the kilogram, and a brief summary of research work on anelasticity in Cu-Be, on the flexure-strip balance and on surface effects on Pt-Ir standards.

The Time section presented current work on TAI, UTC and the organization of international time links, and on feasibility tests that will be carried out in 1994 for a possible real-time prediction of UTC, taking advantage of the improved stability of new commercial caesium clocks.

The Electricity section presented the new programme of bilateral comparisons aimed at providing traceability among electrical standards of resistance and voltage, and described a study of noise in voltage standards.

In Thermometry, work was limited mainly to the verification of sensors used in radiometry. The Radiometry section presented the results of the first international comparison of spectral responsivity of silicon photodiodes, which is now complete. To provide an accurate base for BIPM radiometric measurements, an electrical substitution cryogenic radiometer has been ordered and will be delivered before the end of 1993.

The Ionizing Radiations section presented the work on x and  $\gamma$  ray dosimetry and its practical applications in biology and therapy, the activities in neutron dosimetry, the final results of the international comparison of  $^{75}\text{Se}$  and new work on counting experiments.

The President thanked the physicists for their interesting presentation of the work carried out in the past year and plans for future work. He expressed his pleasure that, despite financial restrictions, the quality of the work had been maintained and that the mission of the BIPM had been fully accomplished.

On behalf of the CIPM, he thanked Mr Bonhoure, head of the Thermometry, radiometry and photometry section, who will retire before the end of 1993, for the forty years he had spent at the BIPM and gave him his best wishes for the future.

Mr Bonhoure replied he had been active in thermometry for many years, and always greatly appreciated the support and encouragement of the CIPM and the BIPM which allowed him to choose and develop his work. He thanked the CIPM and its President for these wonderful years.

### *Dépôt des prototypes*

The following is the report made at the time of the official visit to the vault in which the metric prototypes are kept:

## **Visit to the depository of the metric prototypes**

### MINUTES

On 22 September 1993, at 17 h 30, in the presence of the President of the Comité International des Poids et Mesures, the Director of the Bureau International des Poids et Mesures and the representative of the curator of the Archives de France, the visit to the depository of the metric prototypes at the Pavillon de Breteuil took place.

The three keys necessary to open the depository were assembled : that entrusted to the care of the Director of the Bureau International, that deposited at the Archives Nationales in Paris which Madame L. Favier, Inspecteur général in charge of the Secrétariat général of the Archives Nationales had brought, and finally that kept by the President of the Comité International.

The two iron doors of the vault having been opened as well as the safe, the presence in the latter of the prototypes and their official copies (*témoins*) was verified.

The following readings on the measuring instruments placed in the safe were noted :

temperature	:	21,0 °C
maximum temperature**	:	21,0 °C
minimum temperature**	:	19,0 °C
relative humidity	:	70 %

The safe was then locked, as well as the doors of the vault.

The Director  
of the BIPM,  
T. J. QUINN

For the curator  
of the Archives de France,  
L. FAVIER

The President  
of the CIPM,  
D. KIND

---

\*\* since the last visit.

## 5. Accreditation and certification of national metrology laboratories

Dr Quinn read the following report, which he had already presented to a EUROMET Working Group:

1. The EUROMET Committee at its meeting in Delft in 1992 created a Working Party on Strategy. In its report to the 1993 meeting of the EUROMET Committee in Turin the Working Party drew attention to pressures that are now faced by some national laboratories to seek certification under ISO 9001 or ISO 9002 or accreditation under EN 45001 or ISO Guide 25.

The EUROMET Committee in Turin did not reach any final conclusion and no recommendations were made on this question, but a broad strategy emerged that met with general approval. This strategy recognizes that while pressures vary from country to country there is, worldwide, a very strong move towards certification and accreditation of calibration and testing laboratories and that the national metrology laboratories cannot be immune. It also recognizes that accreditation of calibration services within national laboratories under EN 45001 would be acceptable, but that accreditation should not extend to the activity of the development and maintenance of national standards. The accuracy of national standards, be they primary or secondary, should be demonstrated on the basis of regular international comparisons carried out directly by the BIPM, or through regional comparisons, or through bilateral comparisons with national laboratories having primary standards. Essential to this strategy would be regular and open publication in *Metrologia* of the results of such comparisons. As regards certification under ISO 9001 or ISO 9002, it was accepted that, insofar as such certification concerns management practices, it is up to individual laboratories to choose whether or not to seek certification at some or all levels. Such a choice would be guided by local conditions.

2. A primary standard is taken here to have the meaning given in the *International vocabulary of basic and general terms in metrology* (2nd edition), namely, *a standard that is designated or widely acknowledged as having the highest metrological qualities and whose value is accepted without reference to other standards of the same quantity* (within a specified context). It should be noted that primary standards defined in this way can include standards of derived as well as base units of the SI. A secondary standard is defined as *a standard whose value is assigned by comparison with a primary standard of the same quantity* and a national standard is one *recognized by a national decision to serve, in a country, as the basis for assigning values to other standards of the quantity concerned*.

Few national laboratories have the resources to maintain primary standards in all areas. In most instances, national laboratories maintain as national standards both primary and secondary standards. The secondary

standards would, quite frequently, be verified through the BIPM but otherwise this could also be done at national laboratories.

One should note that the possession of a national standard implies a corresponding competence in the dissemination and international comparison of the standard. For example, the mere possession of a Pt-Ir prototype of the kilogram does not *per se* give a national laboratory a useful national standard of mass. There must also exist an appropriate balance and expertise in using it to disseminate the unit. It is this overall capability that is verified by participation in an international comparison.

3. The formal use of the results of international comparisons of national standards for the purposes of demonstrating the technical competence of national laboratories would require a slightly more structured approach to international comparisons than that which exists at present.

The organization of comparisons and the choice of standards to be compared could be done by the Comités Consultatifs working in close cooperation with the BIPM. The periodicity of comparisons would vary greatly depending upon the stability of the standards in question.

4. A list can be made, without too much difficulty, of those standards generally considered to act as national standards, for example :

*Mass*

- The numbered Pt-Ir national prototypes of the kilogram ;

*Length*

- Lasers stabilized on atomic or molecular transitions according to the *Mise en pratique* of the definition of the metre ;

*Time*

- Laboratory caesium beam standards,
- Commercial caesium beam standards participating in TAI and figuring in the BIPM *Circular T* ;

*Electricity*

- Impedance standards calibrated directly in terms of the calculable capacitor or quantum Hall standard,
- Josephson standards of the volt ;

*Temperature*

- Direct realizations of the ITS-90 ;

*Photometry, radiometry*

- Cryogenic electrical-substitution radiometers ;

*Ionizing radiations*

- Fully-evaluated ionization chambers for x-ray and  $\gamma$ -ray dosimetry.

Although they would take a considerable time to complete, and would require a considerable effort on the part of the BIPM and national laboratories, a more regular and structured series of international comparisons of national standards would undoubtedly improve the coherence and accuracy of world metrology.

The CIPM, therefore, invites the Comités Consultatifs to consider the needs for such comparisons, to arrange in collaboration with the BIPM whatever additional comparisons are found necessary and, in due course, to publish the results in *Metrologia*.

The CIPM also reminds the Comités Consultatifs of the need to ensure world-wide coverage of these comparisons by taking care to include, whenever possible, one or more laboratories from the various regional metrology organizations (*see* Recommendation 1 (CI-1992)).

The President then opened the subject for discussion.

Dr Clapham said that he had discussed this matter in a EUROMET Working Group and reported that the group agreed with the content of Dr Quinn's paper. There could be no prescriptive conclusion to this question. Some national laboratories of metrology are under considerable commercial pressure for certification in order to win contracts. These laboratories agree on the necessity to comply with ISO Guide 25 for all that concerns calibration and testing, though the Guide does not apply to higher levels of activity and to research work. For these activities, some laboratories may pursue certification to ISO 9000. Other laboratories argue that, being constituted by law, it is not possible for any other body to stand in judgement on their actions. But for all laboratories it was necessary to demonstrate international traceability through the results of international comparisons.

Professor Kind made it clear that national metrology institutes cannot be accredited by the BIPM. What the BIPM can do is to carry out international comparisons more frequently, and perhaps in a more structured way, either directly or through its Comités Consultatifs, and to publish the results, leaving the conclusions to be drawn by the readers. Even though the results of comparisons can be used both for scientific and commercial purposes, showing for example whether a measurement standard reaches the level of its peers, it is not up to the Convention du Mètre to make any judgement or accreditation.

Professor Giacomo remarked that the term "international comparison" is used with two different meanings : 1) comparisons aimed at establishing and developing knowledge of the right way to implement the definition of units and to state uncertainties on a sound basis in the most expert laboratories and 2) comparisons referring to well-established methods and devices with a view to demonstrating expertise and capability. He would not like to see the BIPM engaged in the second type of comparison.

Dr Clapham agreed that the accreditation of the national laboratories of metrology must stay within the competence of each individual country (or

regional community). A long discussion followed. Dr Gopal stressed the importance of the coherence of the results of measurements all over the world, and Dr Blevin the urgent need for national laboratories, under the pressure of industry and trade, to obtain recognition of their capabilities in their own country and abroad. Dr Crovini recalled that the organs of the Convention du Mètre had to concentrate on the practical realization and comparison of SI units, and not on questions pertaining to legal metrology.

In conclusion, the President re-emphasized the importance of the publication of the results of comparisons in *Metrologia* and invited national laboratories to take advantage of this and, if desirable, reprint the results in their own journals.

## 6. Metrology in chemistry

Dr Lyons, Chairman of the CIPM Working Group on Metrology in Chemistry, presented his report on the results of preliminary inter-laboratory comparisons carried out on a few reference methods. Study I involved isotope dilution mass spectrometry (IDMS) for the analysis of simple aqueous solutions of inorganic elements made up gravimetrically at the NIST, and Study II the analysis of simple gas mixtures using IDMS, high accuracy mass spectrometry (HAMAS) using external calibration, gas chromatography (GC), chemiluminescence or non-dispersive infrared (NDIR) spectrometry according to a protocol established at the Nederlands Meetinstituut.

The target value of relative accuracy for Study I was  $\pm 1\%$ , but only a small number of laboratories were within this error band. The results seem to be better for Study II, but the number of reporting laboratories is too small to draw general conclusions. The Study I results underscore the need for traceability systems to be established for chemical measurements.

Some members of the CIPM asked how this 1% target had been chosen. Dr Lyons answered it is the best attainable value.

Dr Clapham offered an alternative interpretation of the results. Since agreement at the international reference level was within about 10%, the reported discrepancies at working level of over 100% must be due to quality assurance problems, not to the adequacy of reference materials.

Professor Kind and Dr Plebanski said they were pleased with the results obtained by the Working Group and the results demonstrate that there is a need to reinforce metrology in analytical chemistry.

Dr Lyons then introduced his and the Director's proposal to create a Comité Consultatif. At its 80th meeting in September 1991, the CIPM established a Working Group on Metrology in Chemistry under the chairmanship of Dr Lyons of the NIST. This followed preliminary discussions that had taken place the previous year and the report of an *ad hoc* Working Group, established in 1990, which had been asked to advise the CIPM on whether it should take any action in this field.

The CIPM has, quite properly, been prudent in not moving too quickly into a field of which few of its members have direct experience. The arguments given by the *ad hoc* Working Group after its meeting at the NIST in 1991 were, however, sufficiently persuasive for the CIPM to establish the Working Group in September 1991.

The Working Group's task was to carry out the pilot international comparisons he had just reported on to see whether by doing so the basis of international traceability could be laid. In 1991 the Comité felt that it was premature to ask the Working Group to consider the possibility of establishing a Comité Consultatif in this field, although this had been suggested in the report of the *ad hoc* Working Group.

The need to assure accuracy and international traceability of measurements in chemistry at all levels was the central theme at two meetings that have taken place since September 1992.

— In November 1992 a meeting took place at the European Communities Central Bureau for Nuclear Measurements (CBNM)\*\*\*, Geel (Belgium), organized by the CBMN for Eurachem, on "Comparability and Traceability of Chemical Measurements".

— In March 1993 an International Workshop on the Development of an International Chemical Measurement System took place in Atlanta (USA) in conjunction with the Pittsburgh Conference on Analytical Chemistry. This meeting was organized by the Laboratory of the Government Chemist (Teddington).

The two meetings were attended by chemists already aware of and concerned with the problems of accuracy and traceability, and also by people from national metrology laboratories. Although the chemists emphasized the difficulties inherent in much of their work, there was a broad measure of agreement that the problem of demonstrating accuracy and traceability will not be solved without a coordinated international effort at all levels. Among the conclusions of both meetings was the recognition that the only organization with the mission to establish international traceability to SI at the highest level is the CIPM. The much more extensive work of establishing traceability for all organizations performing analytical chemistry is being led in Europe by Eurachem in collaboration with the International Organization for Standardization (ISO), with international unions such as the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) and international bodies such as the International Laboratory Accreditation Conference (ILAC). At the Atlanta meeting a Working Group, Cooperation on International Traceability in Analytical Chemistry (CITAC), was formed to pursue these collaborations and prepare future meetings at which the problems will be discussed before as wide an audience as possible. At both the Geel and Atlanta meetings

---

\*\*\* renamed Institute for Reference Materials and Measurements (IRMM).

invitations were made and accepted, to present the role of the CIPM in world metrology and describe the CIPM's actions to date regarding metrology in chemistry.

A further significant initiative was taken by the EUROMET Committee, at its meeting in May 1993 in Turin, when it established a new EUROMET subject field "Amount of Substance".

Organizations such as the American Society for Testing and Materials (ASTM) and the Association of Official Analytical Chemists (AOAC) have been conducting interlaboratory comparisons of chemical measurements for many years, but without traceability to the highest level.

In taking the lead in this field it is essential that the CIPM, and in consequence the national metrology laboratories, become involved only at the highest level. This is for two reasons: first the competence of the CIPM and the need for the national laboratories is at this level, and second, there would be strong support on the part of the existing organizations in the chemical analysis field for the CIPM and national laboratories to establish international traceability of the chemical measurement system.

Dr Lyons said that it was his and the Director's view that the broader appreciation that now exists as to the urgency of establishing international traceability, witnessed by the events outlined above, requires a more rapid response from the Comité than was thought right two years ago.

The importance of accuracy in chemical analysis, and the fact that ultimately the essential links to SI are through physical methods, must result in national metrology laboratories becoming more and more involved in this field. In this respect the recent decision of EUROMET, mentioned above, is an indicator.

He continued that, while the hypothesis for establishing traceability in chemical analysis proposed by the Comité in 1991 is still being tested through the international comparisons now in progress, the Comité needs access to well considered advice in this field. The importance of the problem, its long-term nature and the increasing involvement of the national laboratories seem to us to indicate that the creation of a Comité Consultatif would now be appropriate.

By creating a Comité Consultatif now, the Comité would be seen :

- a) to be taking the lead in a field that will be of increasing importance in the future;
- b) to be responding in an adequate and timely way to a need that has become widely recognized;
- c) by clearly setting out the terms of reference of the Comité Consultatif, to be establishing the boundaries within which the responsibilities of the CIPM in this field are seen to lie.

There followed a long discussion on the desirability of creating such a Comité Consultatif now, and on its terms of reference. Some members, while not opposing the decision, were not happy with the terms of reference as proposed and after further discussion they were modified.



Dr Plebanski suggested that the Comité Consultatif should have very broad terms of reference on chemical measurement standards (related to chemical kinetics, thermodynamics, surface chemistry, spectral methods and so on), not reducing the activity of this committee to the amount of substance. Professor Kind was in favour of a "Comité Consultatif pour la Quantité de Matière", as the mole is the only base unit of the SI without a Comité Consultatif.

Finally, the CIPM decided to establish a Comité Consultatif pour la Quantité de Matière (consultative committee for the amount of substance) with the following provisional terms of reference :

— to advise the CIPM on matters relating to the traceability to the SI base units of quantitative chemical measurements;

— to coordinate the activities of the national metrology laboratories in establishing this traceability at the highest level;

— to keep under review the question of whether there is a need for a programme of work at the BIPM to support this activity.

The CIPM requested the Chairman of its Working Group on Metrology in Chemistry, as acting President of the new Comité Consultatif, to undertake the necessary consultations prior to drawing up final terms of reference and a list of members of the Comité Consultatif to be proposed to the CIPM at its meeting in 1994.

Dr Plebanski maintained his view that the proposed terms of reference were too narrow.

The President concluded saying that these are provisional terms of reference. The Comité Consultatif will be working only at the highest level of accuracy, with the aim of establishing the necessary links between the national laboratories.

## **7. Twentieth Conférence Générale des Poids et Mesures, 1995 : preliminary discussion**

Dr Quinn drew the attention of the members of the CIPM to the calendar of the twentieth Conférence Générale to be held in October 1995. The *Convocation* to the Conférence Générale has to be distributed to member States by the end of December 1994, and the final form of the *Convocation* must be approved by the CIPM at its meeting in September 1994. The bureau of the Comité will start discussing the *Programme and budget* in February 1994.

Dr Lyons suggested it would be better to have knowledge of this *Programme* before September 1994 so as to have a possibility of influencing the position of the governments of the member States.

Professor Kind suggested that the outline of the *Programme and budget* and the proposed figures be submitted to the CIPM two or three months before the next meeting.

Dr Quinn drew the attention of the Comité to an important aspect of BIPM funding that is different from that of most national laboratories. All BIPM expenditure, from the normal running expenses, capital investment in equipment, major building repairs to the occasional new building, must come out of the annual budget or savings from previous annual budgets. Experience over the past twenty years has shown that there is almost no possibility of special funds being voted by the Conférence Générale for major investments. It is essential, therefore, that the Conférence Générale votes a dotation having a reasonable margin above expected inflation. The 2 % usually asked for is a minimum and is essential. The contribution of member States to the BIPM represents only about 1 % of their own national budget for metrology, and he maintained that it is a good investment for worldwide coherence of measurement standards.

## **8. Administrative and financial affairs**

The President welcomed Miss Perent, the administrator of the BIPM, and presented the "*Rapport annuel aux Gouvernements des hautes parties contractantes sur la situation administrative et financière du Bureau International des Poids et Mesures en 1992*", and the report of the auditors for 1992. The reports were approved unanimously and the required formal discharge was given to the Director and to the administrator of the BIPM.

A progress report on the 1993 budget was presented and approved. Dr Quinn was pleased to say that the financial situation of the BIPM had improved since the last CIPM meeting, as substantial payments had been received from the Russian Federation in October 1992 and in 1993. Restrictions on spending decided in 1992 were, however, being maintained, and the BIPM should be able to put over 3 million gold francs into the reserves and come close to the desired goal of two-thirds of an annual budget in reserve by the end of 1993.

The restrictions agreed in September 1992 also included the non-replacement of retiring senior staff, the postponement of the contract of one research fellow and the cancellation of another. This situation should not continue for too long. In view of the improved financial situation, Dr Quinn proposed a small relaxation in restrictions on salaries, by allowing them to catch up to the index on 31 December 1993, and by increasing family allowances by 3,5 % in 1994 (these last are 7,7 % lower than in the Coordinated Organizations). There will be no back payment for 1993 and the ceiling on the index up to a rate of inflation of 2 % will be maintained in 1994. The CIPM approved the proposal.

Members of the CIPM expressed their thanks and appreciation of the work that has been done by the staff under these conditions.

A draft budget for 1994 was presented and approved.

The last document submitted to the CIPM was the *Tableau de répartition de la dotation pour 1994*.

This led the discussion to the question of non-paying member States. Dr Quinn informed members that for 1993 the sum of the contributions of seven member States of the Convention du Mètre has been distributed among the forty paying States, which saw their contribution increase by 4,4 %. Although Article 6 of the *Rules* annexed to the *Convention du Mètre* foresees the exclusion from the Convention of a State whose contributions remain unpaid for six years, this has never been implemented and thus distribution of unpaid contributions continues without limit. The French Ministère des Affaires Étrangères takes the view that the text of the Convention du Mètre empowers neither the French Government, nor any other authority, to implement the exclusion rule. The only way out of this would seem to be to convince the States in question that they should withdraw from the Convention. Insofar as they do not do this, options are very limited : either remaining member States pay for the others or the dotation is reduced. Of course, the States that have not paid for six years receive no service at all from the BIPM.

#### *Staff promotions*

Dr Quinn informed members of the CIPM that Mr Girard retired at the end of March 1993 and was replaced by Dr Davis as the head of the Mass section. Mr Bonhoure will retire at the end of October 1993 and will be replaced by Dr Köhler. Dr Davis has already changed grade and been promoted *physicien principal* and Dr Quinn proposed to do the same for Dr Köhler when Mr Bonhoure retires. He asked members of the CIPM to approve these promotions. The CIPM unanimously approved the promotion of Dr Davis and Dr Köhler to the grade of *physicien principal*.

#### *Metrologia*

The President invited Dr Blackburn, the editor of *Metrologia*, to join the CIPM for the discussion on the budget and progress of *Metrologia*.

Dr Blackburn informed the CIPM that the volume and number of articles published in *Metrologia* have increased, and that there is now a queue of highly recommended articles. He recalled that *Metrologia* is now printed by Gauthier-Villars in order to get back on schedule, the printing, at one point, having been thirty-two weeks in arrears with the former printer.

The provisional budget for 1993, and the draft budget for 1994, were presented and approved.

BUDGET FOR 1994

INCOME

gold francs

*Budgetary income:*

1. Contributions from Member States . . . . .	23 067 000
2. Interest on capital . . . . .	1 200 000
3. Verification taxes . . . . .	126 000
Total . . . . .	<u>24 393 000</u>

EXPENDITURE

*A. Staff expenses:*

1. Salaries . . . . .	11 056 000	} 15 678 000
2. Family and social allowances . . . . .	1 832 000	
3. Medical insurance . . . . .	979 000	
4. Industrial injuries insurance . . . . .	42 000	
5. Pension fund . . . . .	1 769 000	

*B. Operating expenses:*

1. Furniture . . . . .	30 000	} 3 424 000
2. Laboratories and workshops . . . . .	1 140 000	
3. Heating, water, electrical energy . . . . .	529 000	
4. Insurance . . . . .	77 000	
5. Printing and publications . . . . .	239 000	
6. Office expenses . . . . .	400 000	
7. Travel expenses and freight charges . . . . .	571 000	
8. General maintenance . . . . .	390 000	
9. Bureau du Comité . . . . .	48 000	

*C. Capital expenditure:*

1. Laboratories . . . . .	2 430 000	} 2 783 000
2. Mechanical workshop . . . . .	95 000	
3. Library . . . . .	258 000	

D. *Buildings* (major maintenance and renovation) . . . . . 755 000

E. *Miscellaneous and unforeseen expenses* . . . . . 365 000

F. *Reserve funds* . . . . . 1 388 000

Total . . . . . 24 393 000

The President congratulated Dr Blackburn and presented him his best wishes for the future. He said he expected more frequent publication of results of international comparisons in *Metrologia*.

## 9. Other business

### 9.1 Changes in membership of the CIPM

The President informed the Comité that since the last Conférence Générale in 1991 Dr Poustovoit had not participated in any of the activities of the CIPM, had made no reply to letters, telexes or faxes from the BIPM or the CIPM and had taken no part in votes for the election of new members. Under these conditions the President proposed that his seat on the CIPM be declared vacant. This was unanimously approved by the Comité.

The CIPM, having been informed of the intention of Dr Lyons to resign at the end of the CIPM meeting, discussed possible candidates to fill the two vacancies thus produced.

### 9.2 Working group on the application of general relativity to metrology

Professor Kovalevsky presented the report by Professor Guinot on the activities and tasks entrusted to the CCDS Working Group on the application of general relativity to metrology initiated by the CIPM at its meeting in 1992.

He said that the working group had been formed by the CCDS at the request of the CIPM by asking competent individuals to work on the effects of general relativity with particular reference to time metrology, but also including some aspects of length metrology. He gave the Comité the proposed composition of this working group and said that International Unions such as URSI, IAU, IUGG, IUPAP had been invited to participate in the working group, as well as representatives of the Comité Consultatif des Unités (CCU) and of the Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM). The only union so far to answer and designate a specialist was the IUGG. Representatives of the CCU and CCDM have been nominated by the Presidents of these Comités Consultatifs.

It is proposed that the Working group on the application of general relativity to metrology be entrusted with the following tasks:

1. Preparation of a report on the interpretation and use of SI units in the framework of the theory of general relativity.

The report should be oriented toward practical applications for weak gravitational fields and low velocities (with respect to the velocity of light).

In this spirit, it should indicate, possibly by examples, when a relativistic treatment of the measurements becomes necessary.

In addition to providing an interpretation of the existing definitions of the units, it should give an unambiguous definition of International Atomic Time (TAI), and describe the synchronization convention for world-wide time metrology. The report should give the most useful formulae, with indications on their range of validity.

The report should suggest a unified system of notations and sign conventions for quantities used in relativistic applications.

2. Studies on the consequences of the increasing accuracy of the realizations of the SI units.

New problems will arise with the increasing accuracy of the realizations of the SI units, especially for time and length. These should be considered by the Working Group in order to prepare the decisions which will have to be taken so that, as far as possible, they satisfy all interested parties.

The CIPM approved the proposed composition and terms of reference of the working group.

### **9.3 Next CIPM meeting**

The CIPM decided that the dates of the next CIPM meeting will be as follows:

27 to 29 September 1994.

The President closed the 82nd meeting of the CIPM thanking everyone present for having contributed to its success.

**Recommendations  
adopted by the  
Comité International des Poids et Mesures  
at its 82nd Meeting**

---

Accuracy of primary frequency standards

RECOMMENDATION 1 (CI-1993)

The Comité International des Poids et Mesures,

*considering*

— that the accuracy of an increasing number of primary frequency standards is now approaching the level of one part in  $10^{14}$ ,

— that new configurations of primary frequency standards have been proposed that appear to have a high potential for accuracy,

— that at a level of accuracy of one part in  $10^{14}$  or higher certain corrections must be made that were previously considered insignificant or not sufficiently well known,

— that an essential step in establishing confidence in the accuracy of primary standards is the international comparison of independent standards of different designs,

*recommends*

— that different configurations of primary frequency standards be made and studied in detail, along with the established ones, and compared using the best means available,

— that all corrections, including those not previously considered significant, be studied in detail and eventually applied,

— that the results of these comparisons, including full accounts of uncertainties, be communicated to the Bureau International des Poids et Mesures.

## Timing of millisecond pulsars

### RECOMMENDATION 2 (CI-1993)

The Comité International des Poids et Mesures,

*considering*

— that the stability of the drift-corrected frequency of some millisecond pulsars is comparable to the stability of atomic frequency standards for averaging times longer than one year,

— that independent data from different pulsars may allow their combination to be used to provide a highly stable scale,

*recommends*

— that radioastronomy observatories already timing millisecond pulsars carry on regular observations and continue the search for new pulsars,

— that other observatories initiate programmes of observations for the timing of millisecond pulsars, aiming at a sub-microsecond measurement noise,

— that reports on the timing data and data reduction procedures be communicated to the Bureau International des Poids et Mesures noting that privacy of the data can be maintained if desired.



## Clock comparison by satellite laser techniques

### RECOMMENDATION 3 (CI-1993)

The Comité International des Poids et Mesures,

*considering*

— the need for long distance time transfer at the highest possible level of accuracy,

— that successful time transfer with a precision of 100 ps has been achieved between Western Europe and North America using LASSO (Laser Synchronization from Satellite Orbit) experiment,

— that time transfer techniques, such as GPS (Global Positioning System), GLONASS (Global Navigation Satellite System) and two-way satellite time transfer, need an independent means of assessment of their accuracy,

— that solutions have been proposed that may lead to clock synchronization by laser techniques using non-geostationary satellites,

*recommends* that the space agencies consider the installation on their satellites of appropriate equipment for clock comparison by satellite laser techniques.

Monitoring the stability of the international prototype of the kilogram

RECOMMENDATION 4 (CI-1993)

The Comité International des Poids et Mesures,

*considering*

— the results of the third periodic verification of national prototypes of the kilogram, which showed significant drifts of the national prototypes, the BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) working copies and the official copies with respect to the international prototype,

— the fundamental impossibility of drawing definite conclusions from these results about the long-term stability of the international prototype and its copies,

— the results of work in many national laboratories aimed at understanding the processes that lead to instability of mass standards,

— the progress now being made in various laboratories towards independent methods of monitoring the stability of mass standards,

*recommends* that laboratories pursue their work on these experiments, and develop new ones, with a view to monitoring the stability of the international prototype of the kilogram and in due course opening the way to a new definition of the unit of mass based upon fundamental or atomic constants.

## Thermodynamic temperature measurements

### RECOMMENDATION 5 (CI-1993)

The Comité International des Poids et Mesures,

*considering*

— the importance of accurate measurements of thermodynamic temperature, as emphasized in Recommendation T 1 (1987),

— the inconsistencies which still exist in determinations of thermodynamic temperature, especially in the regions near 150 K, 700 K and at higher temperatures,

— the desirability of extending the range of the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) below its present lower limit of 0,65 K,

— the importance of the national laboratories and the Bureau International des Poids et Mesures having a capability for thermodynamic temperature measurements using a variety of techniques,

*recommends* that national laboratories pursue fundamental research in thermometry, and in particular the measurement of thermodynamic temperature in the ranges referred to above.

---



---

DIRECTOR'S REPORT  
ON THE ACTIVITY AND MANAGEMENT  
OF THE BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES  
(October 1992 - September 1993)

---

I. — STAFF

*Promotions*

Richard DAVIS, *physicien*, was appointed head of the Mass section from 1 April 1993 and promoted to *physicien principal*. The promotion is subject to ratification by the CIPM during its session of September 1993.

Christian COLAS, *technicien principal*, was promoted *technicien métrologiste*.

François LESUEUR, *technicien principal*, was promoted *technicien métrologiste*.

These last two changes took effect from 1 January 1993.

*Appointment*

Danielle SAILLARD, born 19 August 1948 in Le Havre (Seine-Maritime), previously commercial assistant in a private firm, was engaged as part-time *secrétaire* in the Administration from 24 May 1993.

*Research Fellow*

Leonid VITUSHKIN, born 25 May 1944 in St Petersburg (Russian Federation), chief of the dimensional metrology department of the VNIIM (Russian Federation), was appointed as a Research Fellow in the Length section from 24 August 1993 for a period of two years.

*Research Students*

Peter WOLF, born 23 January 1969 in Kronstadt (Romania), B. Sc. (Hons) Physics and Philosophy at the University of York (United

Kingdom), was appointed as a Postgraduate Research Student in the Time section from 5 October 1992 for a period of three years.

Johan ÅMAN, born 13 October 1968 in Lidköping (Sweden), M.Sc. in Engineering Physics at the Chalmers University of Technology (Sweden), was appointed as a Postgraduate Research Student in the Length section from 12 May 1993 for an initial period of six months.

### *Departure*

Georges GIRARD, *physicien principal*, head of the Mass section, retired on 31 March 1993 after forty-eight years of devoted and effective service, mostly concerned with mass measurement, culminating in his successful completion of the third periodic verification of national prototypes of the kilogram.

## II. — BUILDINGS

### *Observatoire*

Construction of a platform for GPS antennas.  
Redecoration of a laboratory.

### *Grand Pavillon*

Painting of the ceiling of the Grande Salle.  
Continuation of repairs to the shutters.

### *Laser building*

Redecoration of the caretakers' apartment.

### *Ionizing Radiations building*

Painting and varnishing of the door-frames and window-frames.

### *Outbuildings and park*

Removal of the two large conifers in the courtyard.  
Lopping of several large trees near buildings.  
Relaying of the Allée du Mail including the pruning of the recently-planted lime trees and the planting of a beech hedge.  
Installation of a fire hydrant.  
Reconstruction of a stone retaining wall.

### III. — SCIENTIFIC WORK

#### 1. General introduction

In introducing last year's report on the scientific work, I drew attention to the effects of the severe financial constraints that had resulted from the sudden loss of 10 % of the BIPM's income. Following the implementation of a plan adopted by the CIPM for absorbing this reduction over a period of some three years and payments of arrears by some member nations, I am glad to be able to report that the immediate financial situation as regards the scientific work is much improved. In 1993 I have been able to increase laboratory investment to about 90 % of what was foreseen before the 10 % reduction in income occurred.

The third periodic verification of national prototypes of the kilogram has been completed. Most of the prototypes have been returned to their countries of origin, the certificates have been distributed and a full report on the work, presented to the CCM, is given in appendix to this year's report on p. G 35, so that readers can obtain a clear view of the whole operation from beginning to end. A number of conclusions can be drawn from the results. First, it is clear that the mass of the ensemble of national prototypes continues to increase with respect to that of the international prototype, on average by about 0,5  $\mu\text{g}$  per year since the second verification. Second, the reproducibility of weighings using the NBS-2 balance, about 0,5  $\mu\text{g}$ , is significantly better than the stability of the mass of many of the prototypes, which is about 2  $\mu\text{g}$ . The combined uncertainty of 2,3  $\mu\text{g}$  assigned to the results of the third verification stems almost entirely from variations in the mass of some of the BIPM working standards and not from the weighings. Third, the decision to carry out cleaning and washing of the national prototypes as well as the international prototype was the correct one. Overall, the third verification has highlighted the need for a method of linking the mass of the international prototype of the kilogram to atomic or fundamental constants. Any method having a long-term reproducibility better than about 1 part in  $10^8$  would be useful. It would then be possible, within only a few years, to establish whether or not the mass of the international prototype is changing significantly. Other work carried out in the Mass section this year is mentioned only in brief summary to avoid

unduly lengthening the report. It will be described in more detail next year.

In the Length section, considerable time was devoted this year to the final preparation of the new *Mise en pratique* of the definition of the metre, agreed in outline by the CCDM and CIPM in September 1992. The final version, prepared by the BIPM in consultation with a small working group of the CCDM, was agreed by the CCDM and later was formally adopted by the CIPM. It was published in the *Procès-verbaux* of the 1992 CIPM, and will shortly appear in *Metrologia* and in the report of the meeting of the CCDM. In classical length measurement the last of a series of line standards and end gauges has been calibrated for Poland. No other such standards are at present awaiting calibration. In this connection it is worth noting the advice of the CCDM: this work should progressively be phased out in favour of increased effort in the laser field. Further collaboration has taken place this year with the team at the ENS (Paris) making measurements of the Rydberg constant. A new, and more accurate, determination has been made using a BIPM methane-stabilized laser at  $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$  as the frequency reference. Among the laser wavelengths recommended in the new *Mise en pratique* of the definition of the metre are those at 515 nm, 543 nm, 612 nm, 633 nm and  $3,39 \mu\text{m}$ , all of which are maintained or are under study at the BIPM. Most international comparisons continue to take place at a wavelength of 633 nm, but advantages that exist in the other wavelengths may lead to comparisons on these in the future. Calculations have been made of the hyperfine structure of iodine near  $\lambda = 633 \text{ nm}$ . Work at  $\lambda = 515 \text{ nm}$  has been concentrated on the new  $\text{Ar}^+$  system stabilized using the FM sideband technique. Problems with parasitic mode operation have impeded progress with the lasers stabilized at  $\lambda = 543 \text{ nm}$ , but it is hoped that these will disappear when new laser tubes now on order are installed. At  $\lambda = 612 \text{ nm}$  geometrical effects, similar to those studied some years ago in the methane stabilized laser at  $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ , are the subject of a combined theoretical and experimental investigation. The  $\text{CO}_2$  laser stabilized at  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$  is now in operation and experiments are being carried out to characterize its servo control and other operating parameters. An associated 1,75 m Fabry-Perot interferometer has been constructed. The filling and supply of iodine cells for national laboratories and others continues: fifty have been prepared since August 1992.

In the Time section, the regular production of TAI and UTC continues, with every occasion being taken to improve the efficiency of the calculations and the quality of the information given to users. As a result of discussions that took place during the CCDS meeting certain modifications were made to *Circular T*, in particular the values  $[\text{UTC} - \text{UTC}(k)]$  and  $[\text{TAI} - \text{TA}(k)]$  are now given to the nearest 1 ns instead of the nearest 10 ns, as in the past. As has been the case for a number of years, the conformity of the TAI scale interval to the SI second still rests almost entirely on the data of a single laboratory, the PTB, where the primary



standards are recognized as being more accurate than anywhere else. Since July 1992 the TAI frequency has remained almost constant with respect to the PTB standards, so just one frequency steering correction has been applied. It is interesting to note that the absence of a need to apply such a correction indicates that the ensemble of clocks contributing to TAI is at present not drifting with respect to the most accurate primary standards. In the production of TAI, a net improvement in the quality of the input data has occurred. This is due to a number of factors, the most important of which are that the quality of the clocks in the timing centres is improving and nearly all the timing centres now compare their local realizations of UTC using GPS strict common views. These improvements in data continue to stimulate our investigations into how TAI, its calculation and dissemination, can be improved. In addition to the GPS common-view method we are continuing to study other techniques of time comparison such as the use of GLONASS, LASSO and two-way time transfer. The application of general relativity to time metrology, now the object of a CCDS working group, is more and more of direct interest to our work on time scales. Recent two-way and LASSO time transfer experiments have given reproducibilities of a few hundred picoseconds. At this level, the correction to time comparisons between clocks on the surface of the Earth due to Earth rotation (effect known as the Sagnac effect) must be well understood. A new formula taking the correction to a higher order has been developed. Interest continues in collecting pulsar data with a view to generating a pulsar time scale, which may be more stable in the long term (several years) than TAI. We are collaborating with radio-astronomy groups in this field, in particular by providing them with latest versions of TT(BIPM). Another activity requiring a very accurate time scale is Very Long Baseline Interferometry (VLBI), used for establishing reference frames in geodesy and astrometry. Here also we are collaborating with laboratories working in the field. The BIPM Time laboratory now includes an advanced multi-channel dual-frequency GPS receiver which is currently under test. The possibility of obtaining a loan of one of the new Hewlett-Packard 5071 A caesium beam standards is being explored. These newly designed clocks are very stable having a flicker floor level characterized by an Allan deviation of the order of 6 parts in  $10^{15}$  for averaging intervals of between ten days and sixty days.

In the Electricity section, highlights of this year's activities include the successful installation and testing of a 10 V Josephson array standard, and the completion of a travelling quantum-Hall effect (QHE) resistance standard. Using the new 10 V Josephson array, agreement to better than 1 part in  $10^8$  with respect to our 1,018 V Josephson standard was obtained, using the 1,018 V to 10 V comparator. Two more international comparisons of our 1 volt Josephson array were completed with the OFMET (Switzerland) and the VSL/NMi (Netherlands). The results show relative differences not exceeding 7 parts in  $10^{10}$ . A precise comparison

of half-integer step voltages to the usual integer step voltages of a second 1 volt array confirms the Josephson relation for half-integer steps to within 3 parts in  $10^{10}$ . A transportable quantum-Hall effect resistance standard has been built and tested employing a new 11 tesla magnet. This is designed to be taken to other laboratories so that QHE systems can be compared directly without using the traditional travelling resistance standards, whose stability is well below that of the QHE systems. Tests show that resistors can be calibrated with the new QHE system with respect to  $R_{K-90}$  with an uncertainty of a few parts in  $10^9$ . A novel technique was devised, and experimentally verified, for connecting the samples in series and parallel combinations to yield a total resistance of very high accuracy. This work complements that related to the transportable 1 volt Josephson array system which has now successfully linked the Josephson reference standards of eight member laboratories of the CCE. To establish publicly documented traceability of resistance and voltage standards among national laboratories that do not directly use reference standards based on the Josephson or quantum-Hall effects, a new programme of bilateral comparisons has begun. These comparisons will be made using conventional travelling standards. Three laboratories have already participated in the programme. Work on capacitance standards has been taken up again after a pause of some years. The plan is to calibrate 10 pF capacitance standards in terms of the quantum-Hall resistance using a capacitance bridge and a quadrature bridge. The capacitance bridge has been completed and tested. A study of the power spectral density of electrical noise now under way will examine the limitations imposed by noise on our voltage standards and the equipment used to compare them. A systematic study has begun on the effects of changes in ambient humidity on the behaviour of Zener-diode based voltage standards.

In the Radiometry and photometry section, the international comparison of spectral responsivity of silicon photodiodes has continued. Fourteen national laboratories have participated in this, the first BIPM comparison in the field of spectroradiometry. Each participating laboratory was sent a set of four detectors, calibrated and tested at the BIPM, comprising three planar photodiodes and one trap detector made up of three integrally-mounted planar photodiodes. On return from the laboratories the photodiodes and trap detectors generally showed that they had maintained good stability over the period of the comparison, but the trap detectors were better. Only in the UV region were significant changes observed, apparently an ageing effect resulting from the UV irradiance. The results of the comparison will be available for distribution to participating laboratories before the end of 1993 in time for them to be considered and discussed at the meeting of the CCPR scheduled for September 1994. Five additional laboratories expressed interest in the comparison after it had begun. A second round of comparisons is now under way to include these five laboratories. A theoretical and experimental study of diffraction effects at arbitrarily shaped apertures has begun with a view to establishing numerical methods suitable

for carrying out diffraction calculations with an accuracy of a few parts in  $10^5$ . Developments in absolute radiometers now require such calculations and it has been found that the standard numerical and analytical methods used for many years are not adequate at this level of accuracy. Work has also started on the accurate measurement of the residual diffuse reflectance of supposedly specular surfaces, in particular the surfaces of photodiodes. In the field of pressure and temperature measurements, the BIPM primary manobarmeter has been re-conditioned and is now back in operation. Calibrations on the ITS-90 Pt-resistance thermometers for other sections of the BIPM are now made as required.

In the Ionizing Radiations section the work is divided into two broad categories, dosimetry and radionuclides. In the dosimetry field, for  $\gamma$ -rays and x-rays, we have found that the air kerma calibration factor of secondary standard ionization chambers in a  $^{60}\text{Co}$  beam has a small but significant dependence on the beam spectrum response. In international comparisons of air kerma standards this influence contributes to the overall uncertainty. A small decrease has been observed in measured values of absorbed dose to water,  $D_w$ , using the 90 TBq source installed in 1987. It is not yet clear whether this decrease is due to impurities in the source or to the measuring equipment. Comparisons are being made between values of  $D_w$  calculated according to a well established code from the IAEA and experimental values obtained directly. The results show agreement to within about 1 %. Among the calibrations made this year three sets of thermoluminescent dosimeters were calibrated for the IAEA. This reinforces the traceability of the seventy-two SSDL laboratories in the IAEA network to the BIPM. The installation of the new  $^{137}\text{Cs}$  source is under way. In neutron dosimetry, the international comparison of neutron fluence measurements continues. This comparison, which includes six participating laboratories, is expected to be completed in mid-1995. The response functions and detection efficiencies of the BIPM liquid scintillation counter have been calculated using Monte Carlo codes supplied by the PTB. The results of the calculations are in good agreement with those obtained experimentally. The calibration of an Am-Be neutron source using the manganese bath method is now in progress. In the field of radionuclides the final report on the international comparison of  $^{75}\text{Se}$  activity measurements is near completion. A draft was discussed at the recent meeting of Section II of the CCEMRI. Twenty-one laboratories participated in the comparison measurements, which are inherently difficult due to the presence of a metastable state in the decay scheme of the nuclide. This year the work on counting statistics has included a study of the statistics of a scaled-down Poisson process and an examination of a proposal for a novel on-line dead-time corrector. We believe that this proposal, known as the Galushka method, when properly implemented electronically, may prove to be useful and convenient for many investigations although care will have to be taken in its use as subsequent corrections may be strongly correlated.

## 1.1 Publications, lectures, travel not directly related to individual sections

### 1.1.1 External publications

QUINN T. J., News from the BIPM, *Metrologia*, 1993, **30**, 1-5.

### 1.1.2 Travel (committees, visits to laboratories and institutions)

T. J. Quinn visited:

— Baltimore (USA), 5-6 October 1992, to attend a radiometry conference NEWRAD'92;

— Querétaro (Mexico), 7-8 October 1992, where he gave a lecture entitled "The BIPM and world metrology" at a NORAMET conference organized by the Centro Nacional de Metrología;

— Boulder (USA), 9-10 October 1992, where he visited the Joint Institute for Laboratory Astrophysics;

— Ottawa (Canada), 11-14 October 1992, where he attended a meeting of the NRC Advisory Committee of the Institute for National Measurement Standards;

— Brussels (Belgium), 22 October 1992, where he attended a meeting of the BCR Advisory Committee of the Commission of the European Communities and presented his Evaluation Report on the BCR;

— London (UK), 9 November 1992 and 5 April 1993, where he attended meetings of the editorial board of *Reports on Progress in Physics*;

— Geel (Belgium), 10-12 November 1992, where he attended a Eurachem Workshop at the Central Bureau for Nuclear Measurements on metrology in chemistry and gave lectures on the "Role of the BIPM in world metrology" and "Traceability in physical measurements";

— Turin (Italy), 16 December 1992, 31 March and 7 July 1993, to attend meetings of the IMGC Scientific Council;

— Braunschweig (Germany), 13-14 January 1993, where he visited the PTB;

— Ottawa (Canada), 11-12 February 1993, where he attended a meeting of the NRC Advisory Committee of the Institute for Measurement Standards;

— Washington DC (USA), 10 March 1993, where he visited the NIST;

— Atlanta (USA), 11-12 March 1993, where he attended a meeting on "Development of an International Chemical Measurement System" organized in conjunction with the Pittsburgh Conference;

— Pisa (Italy), 7-8 April 1993, where he attended the STEP (Satellite Test of the Equivalence Principle) Symposium and gave a lecture on the measurement of density inhomogeneity in metals;

— Turin (Italy), 13-14 May 1993, where he attended the EUROMET Committee meeting;

— Brussels (Belgium), 24 May 1993, where he attended a WECC Symposium on Traceability and the European Market and gave a lecture on "BIPM and Traceability of Measurement Standards";

— Geneva (Switzerland), 8 June 1993, where he attended a meeting of ISO TAG 4;

— Culham (UK), 21 June 1993, where he visited the JET (Joint European Torus);

— Teddington (UK), 22-23 June 1993, where a meeting of the bureau of the Comité was held at the NPL;

— Lisbon (Portugal), 9 August 1993, where he attended a meeting of the IDCNS of IUPAC.

D. A. Blackburn visited:

— Erice (Italy), 13-17 October 1992, where he attended a workshop on "Standardization of quantities of interest in interdisciplinary research and their symbols";

— Santa Maria Imbaro (Italy), 18-22 July 1993, where he attended the Seventh Conference and General Assembly of the International Federation of Science Editors.

## 1.2 Activities related to external organizations

T. J. Quinn regularly attends meetings of the Scientific Council of the IMGc (Turin), is now a member of the CODATA Task Group on Fundamental Constants having completed a six year term as Chairman, is a member of the IUPAC Interdivisional Committee on Nomenclature and Symbols, the Advisory Committee of the NRC Institute for National Measurement Standards (Ottawa) and the Comité Scientifique of the Laboratoire de l'Horloge Atomique (Orsay). He is a member of the editorial board of the journal *Reports on Progress in Physics* of the Institute of Physics and was Chairman of an evaluation panel set up by the European Commission to examine and report on the Commission's activities in the field of measurement and testing under the BCR programme. He is a member of a Fundamental Physics *ad hoc* Working Group of the European Space Agency.

## 2. Length (J.-M. Chartier)

### 2.1 General remarks

Again a significant fraction of our work has been devoted to support of the CCDM. In collaboration with a small working group of the CCDM we drew up the final text of the new "*Mise en Pratique* of the definition of the mètre" comprising the list of the recommended radiations and the three associated appendices. Close collaboration has continued with the ENS (Paris), and a new value for the Rydberg constant, based entirely on frequency measurements, has been obtained. The next phase of the work will be an original experiment in which the two-photon transitions of  $5S_{1/2}$

and  $5D_{3/2}$  of rubidium at  $\lambda \approx 778$  nm are used to link the frequency of the (He-Ne)/CH<sub>4</sub> laser at  $\lambda \approx 3,39$   $\mu\text{m}$  with that of the (He-Ne)/I<sub>2</sub> laser at  $\lambda \approx 633$  nm. International comparisons of lasers stabilized at  $\lambda \approx 633$  nm have been carried out with Portugal, USA and Canada. Our work on the filling and testing of iodine cells has again increased in volume. This year we treated fifty cells.

## 2.2 Classical length measurement (L. Robertsson, J.-M. Chartier)

Three end gauges of 500 mm, 700 mm and 800 mm from the PKNM (Warsaw) have been calibrated. The poor planarity of these end gauges made their calibration difficult. For the same reason, we were unable to calibrate a fourth end gauge of 1000 mm from this laboratory.

## 2.3 Lasers

### 2.3.1 Iodine-stabilized argon lasers at $\lambda \approx 515$ nm using external cells (L. Robertsson, S. Picard, R. Goebel)

Work has been concentrated on the new Ar<sup>+</sup> system, BIAR2. Stabilization to iodine, using the FM-sideband technique, has been made and preliminary beat measurements between BIAR2 and BIAR1, the stabilized laser lent by the PTB, have begun. To obtain a narrower laser line width, the fast servo loop used for the correction of the frequency fluctuation of the laser has been improved. In addition to a low frequency, wide dynamic range, piezo-ceramic feedback loop, an intracavity electro-optic crystal, fed on each side by two feedback loops of different bandwidths, is used. Figure 2.1 shows the residual frequency noise spectral density after successive activation of the three different loops. The dotted line represents an estimation of the free running laser line width. This level results from a large frequency jitter at a few hundred hertz. The residual line width, with all three loops connected, is estimated to be several kilohertz in a 100 kHz bandwidth.

The first beat measurements between BIAR1 and BIAR2 have been made. At present, the combined relative Allan standard deviation for the two lasers is about 8 parts in  $10^{13}$  for an averaging time of 1 second and reaches a few parts in  $10^{13}$  after 3 seconds. It is believed that the BIAR1 makes the larger contribution to this standard deviation.

A direct frequency comparison with both lasers locked to the same component was made with one laser shifted in frequency by an acousto-optic modulator. Thirty-four components of the transitions 43-0, P(13) and 43-0, R(15) were compared in this way. For well isolated components like  $a_1 \dots a_4$  the difference in frequency was less than 2,5 kHz, but some other components showed differences in the range of 10 kHz-20 kHz. It may be that these differences arise from the different effects of neighbouring

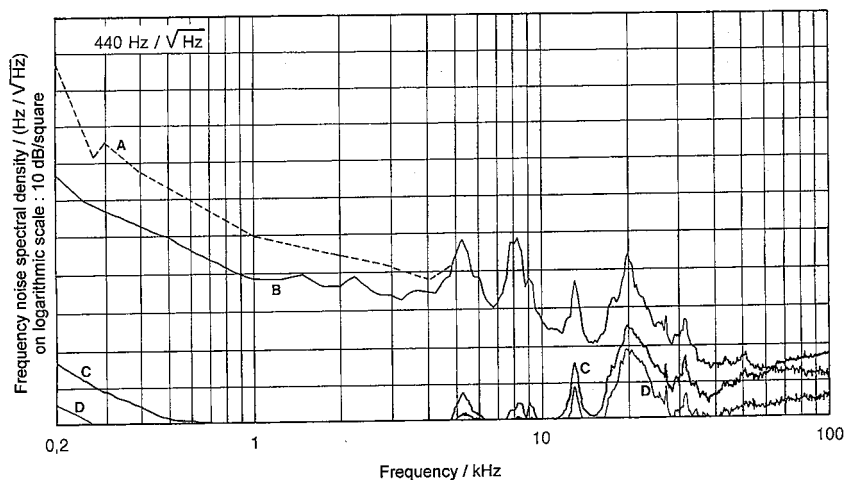


Fig. 2.1. — Residual frequency noise spectral density for different levels of feedback; A: laser unlocked; B: slow loop connected; C: Slow and medium loops connected; D: Slow, medium and fast loops connected.

components on measurements derived from the two separate spectroscopic techniques used. As a difference in frequency of less than 1 kHz was found for reference component  $a_3$ , the two spectroscopic techniques do not appear to cause significant frequency differences in well-separated components.

### 2.3.2 Iodine-stabilized He-Ne lasers at $\lambda \approx 543,5$ nm using external cells (J.-M. Chartier)

In the course of the year, two BIPM stabilized lasers, GRENE1 and GRENE2, have been renovated. The main changes are to the mechanical design and involve the replacement of the former sealed-mirror laser tubes by tubes having one sealed mirror and one Brewster window. These modifications provide a large range for cavity length compensation.

Currently, only laser GRENE2 is working, and in this a parasite mode inherent to the geometry of the laser tube is activated at random. Even so, using the beat frequency technique, we have calibrated a laser stabilized on two orthogonal polarization modes. This laser, which belongs to the LNE (Paris), also presented mode problems. We hope to avoid this problem in the future by using new laser tubes which are designed to work on a single frequency. The quality of the laser tubes is now critical: they operate at one of the wavelengths recommended at the last meeting of the CCDM.

### 2.3.3 Iodine-stabilized He-Ne lasers at $\lambda \approx 612$ nm using internal and external cells (L. Robertsson)

It has been known for a long time that, in He-Ne/CH<sub>4</sub> systems, the size and position of the detector used for the detection of the demodulation signal influence the frequency of the lasers. Similar effects have been found in lasers BIOR3 and BIOR4 at  $\lambda \approx 612$  nm. In both cases the problem has been reduced by the introduction of a lens to concentrate the light onto the detector surface.

We have made a systematic study of this effect by measuring, under various conditions, the distribution of the  $3f$  signal over the cross section of the laser beam in the detector plane and have found a spatial inhomogeneity of the signal which depends on the position of the laser frequency on the absorption line.

A model has been formulated in which the spectral components of a modulated laser beam transverse the absorption cell in a frequency-dependent manner, as a consequence of the self-focusing effect, and reach the detector plane in such a way as to yield a spatial inhomogeneity of the  $3f$  signal. Numerical evaluation of the model gives good agreement with experimental data but only if a strong enhancement of the self-focusing effect is applied [9].

### 2.3.4 Iodine-stabilized He-Ne lasers at $\lambda \approx 633$ nm using internal cells (J.-M. Chartier)

#### i) Comparison between the BIPM lasers

A frequency shift of a few kilohertz has been confirmed on the BIPM2 and BIPM3 lasers after the replacement of their CW radiation gain tubes by NEC GLT2700 gain tubes.

Comparisons with the BIPM4 laser led to:

in January 1993	$f_{\text{BIPM2}} - f_{\text{BIPM4}} = + 3,8$ kHz,	$s = 1,3$ kHz,
in August 1993	$f_{\text{BIPM2}} - f_{\text{BIPM4}} = - 1,6$ kHz,	$s = 1,9$ kHz,
in March 1993	$f_{\text{BIPM3}} - f_{\text{BIPM4}} = - 0,5$ kHz,	$s = 1,1$ kHz,
in June 1993	$f_{\text{BIPM3}} - f_{\text{BIPM4}} = - 0,3$ kHz,	$s = 1,5$ kHz,
in July 1993	$f_{\text{BIPM3}} - f_{\text{BIPM4}} = - 3,2$ kHz,	$s = 0,8$ kHz,
in August 1993	$f_{\text{BIPM3}} - f_{\text{BIPM4}} = - 3,6$ kHz,	$s = 3,5$ kHz,

where  $s$  is an estimate of the standard deviation of one measurement.

In our reports for the last two years, we described new portable lasers at  $\lambda \approx 633$  nm built at the BIPM. This type of laser met great interest in the national laboratories where a commercial version made by Axis Instruments (Boulder, USA) is used both as a primary standard and, in absolute gravimeters, as a wavelength standard.



Currently, two such portable lasers are used for international comparisons made outside of the BIPM. Between June and August 1993, four calibrations of these lasers (BIPMP1 and BIPMP3) against the reference laser BIPM4 gave the following averages:

$$\begin{aligned} f_{\text{BIPMP1}} - f_{\text{BIPM4}} &= + 0,6 \text{ kHz}, & s &= 3,2 \text{ kHz}, \\ f_{\text{BIPMP3}} - f_{\text{BIPM4}} &= + 1,3 \text{ kHz}, & s &= 3,8 \text{ kHz}. \end{aligned}$$

ii) *International comparisons*

In January 1993, the Sextant laser bought by the IPQ (Portugal) in 1991 was brought to the BIPM and compared with the BIPM4 reference laser using the beat frequency technique. The results give:

$$f_{\text{IPQ2}} - f_{\text{BIPM4}} = - 2,2 \text{ kHz}, \quad s = 6,0 \text{ kHz}.$$

In July 1993, the Axis Instruments laser ISL101, bought by the NIST (USA), was compared against the two portable BIPM lasers BIPMP1 and BIPMP3, during a visit to Boulder (Colorado). The results obtained are:

$$\begin{aligned} f_{\text{ISL101}} - f_{\text{BIPMP1}} &= - 0,2 \text{ kHz}, & s &= 0,6 \text{ kHz}; \\ f_{\text{ISL101}} - f_{\text{BIPMP3}} &= - 0,9 \text{ kHz}, & s &= 0,5 \text{ kHz}. \end{aligned}$$

In July 1993, at the NIST (Gaithersburg, USA), the NIST laser NIST1 was compared with the BIPM laser BIPMP3, and gave:

$$f_{\text{NIST1}} - f_{\text{BIPMP3}} = + 40,2 \text{ kHz}, \quad s = 1,8 \text{ kHz}.$$

After adjustment of the DC offset on the NIST1 laser electronic servo, a second set of measurements gave:

$$f_{\text{NIST1}} - f_{\text{BIPMP3}} = - 2,4 \text{ kHz}, \quad s = 1,7 \text{ kHz}.$$

In September 1993, at the BIPM, the Axis Instruments laser ISL103 belonging to the NRC (Canada) was compared with our BIPM laser reference BIPM4, and the results are:

$$f_{\text{ISL103}} - f_{\text{BIPM4}} = + 10,3 \text{ kHz}, \quad s = 1,5 \text{ kHz}.$$

iii) *Others*

We have also calibrated a Tesa Zeeman (UK) stabilized laser belonging to the IPQ. The calibration made by the beat frequency technique against the BIPM4 laser gives:

$$f = 473\,612\,771,0 \text{ MHz},$$

with an estimation of the standard deviation of the mean value of 0,3 MHz.

### 2.3.5 Methane-stabilized He-Ne lasers at $\lambda \approx 3,39 \mu\text{m}$ using internal and external cells (R. Felder)

#### i) *Internal cell devices*

After its return from the 1992 ENS experiment, laser VB was compared with laser VNIBI by a beat frequency method. The absolute frequency of VNIBI being known, we found for VB operating in normal conditions:

$$f(\text{VB}) = 88\,376\,181\,602,6 \text{ kHz}, \quad s = 1,5 \text{ kHz}.$$

This value differs by less than 100 Hz, less than 1 part in  $10^{12}$ , from that found in February 1992. No significant change has therefore been observed in the emitted frequency of laser VB in this time.

#### ii) *External cell devices*

Due to unexpected technical problems, the delivery of a 1,5 GHz acousto-optic modulator at  $\lambda \approx 3,39 \mu\text{m}$  has been postponed by the manufacturer. Therefore, to study the E line we have constructed a special He-Ne laser using the Zeeman effect. The magnets needed for this device were kindly loaned by P. Cérez of the LHA and the mechanical modifications were designed in the BIPM workshop. This experiment should begin in the autumn of 1993.

#### iii) *Collaboration with other laboratories*

In March and May 1993 we participated in a new determination of the Rydberg constant at the ENS (Paris). As in last year's measurement, laser VB was used as a reference in this experiment. On this occasion the Rydberg constant was determined entirely by frequency measurements. Experimental results remain under investigation, but we already know that there is no discrepancy with the previous result. We should soon obtain the most accurate value of the Rydberg constant ever published.

Taking benefit of the assembled equipment, we carried out the spectroscopy of  $5S_{1/2}-5D_{3/2}$  two-photon transitions in rubidium. Preliminary results show that it should be possible to construct a new frequency standard in the near infrared ( $\lambda \approx 778 \text{ nm}$ ) having a performance similar to that of the (He-Ne)/CH<sub>4</sub> laser. Moreover, as the sum of the emitted frequencies of these two devices coincides, to within a few gigahertz, with that of the (He-Ne)/I<sub>2</sub> laser at  $\lambda \approx 633 \text{ nm}$ , it should be possible to determine the frequency of the latter to within a few parts in  $10^{12}$  using a device much simpler than current frequency-multiplication chains. We intend to start this experiment soon.

#### iv) *Others activities*

The turbo-molecular pump of our vacuum system was changed three times before the operational set-up was reliable. Nevertheless, we have

continued our work on the filling process and are now able to provide He-Ne laser tubes with an expected lifetime of several years.

Sealing Brewster windows using the Mallory bonding process has not yet given satisfactory results. Unexplained physical processes alter the fluoride glasses used in this experiment. To avoid such phenomena, the workshop has provided a new mechanical mounting: this will be tested soon.

### **2.3.6 CO<sub>2</sub> laser at $\lambda \approx 10,6 \mu\text{m}$ (S. Picard)**

The work on a stabilized CO<sub>2</sub> laser has continued. The eigen-frequencies of the piezo-ceramic of the laser have been measured, and pressure effects in the laser tube have been examined. Intensity variations have been compared with the thermal behaviour of the laser. The beam intensity distribution has been measured, assuming a Gaussian-like intensity distribution. A HgCdTe liquid-nitrogen cooled IR detector permits detection at up to 100 MHz. The beam-pointing stability appears satisfactory. Some mechanical improvements will be made towards the end of 1993. The laser and its characteristics will be described in more detail in a future BIPM report.

A 1,75 m long Fabry-Perot interferometer has meanwhile been constructed and mounted. A turbo-molecular pump system has been connected and tested. Construction of the optical mount to permit saturated absorption is in progress.

Some modules for the electronic servo system of the laser and cavity have been constructed, and others are under construction: helpful comments from Dr O. Acef and Mr J.-P. Berthet (LPTF) are acknowledged.

### **2.3.7 Iodine cells (J.-M. Chartier, S. Picard)**

Since August 1992, we have filled thirty-four saturated iodine cells (denoted type S) and sixteen non-saturated iodine cells (now denoted type N). Most of these cells have been distributed, essentially to national laboratories. All were checked by measurements of the relative impurity concentration, using a laser induced fluorescence technique at  $\lambda \approx 502 \text{ nm}$ , and by measurements of the frequency shift, using the beat frequency technique with lasers at  $\lambda \approx 633 \text{ nm}$ .

### **2.3.8 Hyperfine structure (S. Picard)**

Cooperation between Dr J. Blabla (CMI), Dr A. Razet (INM) and the BIPM was re-established in the summer of 1992. Hyperfine constants were fitted to experimental results obtained by Dr Blabla and his colleagues from fifth and third harmonic hyperfine spectra at  $\lambda \approx 633 \text{ nm}$  in iodine. The

results have been published [10]. The hyperfine calculation programmes made at the BIPM have been communicated to Dr F. Bertinotto (IMGC) and to the National Tsing Hua University (Taiwan). Communication with Dr Arie at Stanford University concerning these matters has also taken place during the year.

## 2.4 Publications, lectures, travel: Length section

### 2.4.1 External publications

1. CHARTIER J.-M., DARNEDDE H., FRENNEBERG J., HENNINGSEN J., KÄRN U., PENDRILL L., JIANPEI HU, PETERSEN J. C., POULSEN O., RAMANUJAM P. S., RIEHLE F., ROBERTSSON L., STÄHLBERG B., WAHLGREN H., Intercomparison of Northern European  $^{127}\text{I}_2$ -stabilized He-Ne Lasers at  $\lambda = 633$  nm, *Metrologia*, 1992, **29**, 331-339.
2. CHARTIER J.-M., PICARD-FREDIN S., CHARTIER A., International Comparison of Iodine Cells, *Metrologia*, 1992, **29**, 361-367.
3. CHARTIER J.-M., LABOT J., SASAGAWA G., NIEBAUER T. M., HOLLANDER W., A Portable Iodine Stabilized He-Ne Laser and its Use in an Absolute Gravimeter, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**, 420-422.
4. QUINN T. J., CHARTIER J.-M., A New Type of Iodine Cell for Stabilized Lasers, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**, 405-406.
5. NEZ F., PLIMMER M. D., BOURZEIX S., JULIEN L., BIRABEN F., CAGNAC B., FELDER R., JUNCAR P., MILLERIOUX Y., Towards a Frequency Measurement of the Rydberg Constant using the 2S-8S and 2S-8D Transitions in Hydrogen, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**, 217-221.
6. NEZ F., BIRABEN F., FELDER R., MILLERIOUX Y., Optical Frequency Determination of the Hyperfine Components of the  $5\text{S}_{1/2}$ - $5\text{D}_{3/2}$  Two-Photon Transitions in Rubidium, *Opt. Commun.*, 1993, **102**, 432-438.
7. NEZ F., PLIMMER M. D., BOURZEIX S., JULIEN L., BIRABEN F., FELDER R., MILLERIOUX Y., DE NATALE P., Absolute Frequency Measurement of the 2S-8S/D Transitions in Atomic Hydrogen, *Proc. ELICOLS '93*, 1993, 11-16.
8. NEZ F., BOURZEIX S., JULIEN L., BIRABEN F., FELDER R., MILLERIOUX Y., Frequency Measurement of the  $5\text{S}_{1/2}$ - $5\text{D}_{3/2}$  Two-Photon Transition in Rb and Prospect for Measuring the He-Ne/ $\text{I}_2$  laser at 633 nm, *Proc. ELICOLS '93*, 1993, 9-10.
9. NEZ F., PLIMMER M. D., BOURZEIX S., JULIEN L., BIRABEN F., FELDER R., MILLERIOUX Y., DE NATALE P., First Pure Frequency Measurement of an Optical Transition in Atomic Hydrogen: Better Determination of the Rydberg Constant, *Europhys. Lett.*, 1993, **24**, 635-640.

10. BLABLA J., PICARD-FREDIN S., RAZET A., On the Fifth-Derivative Spectrum of the Hyperfine Structure of  $^{127}\text{I}_2$  at the 633 nm Wavelength of the Helium-Neon Laser, *Journal of Molecular Spectroscopy*, 1993, **159**, 282-285.

#### 2.4.2 Lectures and presentations

R. Felder gave a presentation [7] and presented a poster [8] at ELICOLS'93, he also contributed to a poster at EQEC'93.

R. Felder, F. Nez, M.D. Plimmer, S. Bourzeix, L. Julien, F. Biraben, and P. De Natale, presented a poster at the EGAS'93 entitled "Frequency Measurement of the Rydberg Constant in Atomic Hydrogen", see *25th EGAS Abstracts*, 1993 (P1-057).

L. Robertsson gave a presentation at the Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden on 22 April 1993 entitled "Line-Shape Distortions Due to Self-Focusing Effects in Saturation Spectroscopy Using Frequency-Modulated Techniques".

L. Robertsson presented a poster at ELICOLS'93, entitled "Systematic Frequency Shifts Related to Detector Geometry Observed in Laser Systems Stabilized by Saturated Absorption", see *ELICOLS '93 Digest*, 1993.

#### 2.4.3 Travel (committees, visits to laboratories and institutions)

J.-M. Chartier visited:

— the JILA and Axis Instruments (Boulder, USA), 20-24 September 1992, to test the performance of two BIPM portable He-Ne lasers at  $\lambda \approx 633$  nm;

— the CEM (Madrid, Spain), 5-6 November 1992, where he checked the performance of the CEM reference iodine-stabilized He-Ne laser at  $\lambda \approx 633$  nm;

— the Institut Polytechnique des Sciences Appliquées (Paris, France), 15 December 1992, as a member of the examining Committee for a Mémoire d'ingénieur;

— the LHA (Orsay, France), 22 January 1993, as a member of the examining committee for a Docteur en Sciences thesis;

— the LNE (Paris, France), 22 March 1993;

— the ETCA (Arcueil, France), 23 March 1993;

— the DSS (Bangkok, Thailand), 14 April-1 May 1993, as an expert invited by the United Nations to organize the development of the Dimensional and Engineering Division of the DSS and to give eight lectures;

— the École Nationale Supérieure des Sciences Appliquées et de Technologie (Lannion, France), 16 June 1993, as a member of the examining committee for a Docteur en Sciences thesis;

— the JILA and Axis Instruments (Boulder, USA), 24-29 July 1993, and the NIST (Gaithersburg, USA), 29-31 July 1993, to make comparisons of iodine-stabilized lasers at  $\lambda \approx 633$  nm.

R. Felder visited:

- the LPTF (Paris, France), 12-19 May 1993;
- Hot Springs (Virginia, USA), 13-18 June 1993, to take part in the ELICOLS'93 conference;
- Limoges (France), 6-8 September 1993, to take part in the COLOQ 3 conference.

L. Robertsson visited:

- Hot Springs (Virginia, USA), 13-18 June 1993, to take part in the ELICOLS'93 conference;
- the Axis Instruments (Boulder, USA), 19 June-4 July 1993, to supervise the final steps in the construction of the absolute gravimeter bought by the BIPM;
- the JILA (Boulder, USA), 5 July-2 August 1993, to test the performance of BIPM-Axis absolute gravimeter.

S. Picard visited:

- the IMGC (Turin, Italy), 19-20 October 1992.

## 2.5 Visitors to the Length section

### 2.5.1 Guest workers

Mr Z. Ramotowski (PKNM, Warsaw, Poland) stayed at the BIPM 30 November-15 December 1992 to participate in the calibration of the end gauges from his laboratory.

Mrs F. Lettaô Dasilva Saraiva and Mr J.-J. Dacosta Guedelha (IPQ, Lisbon, Portugal) stayed at the BIPM 11-21 January 1993 for a comparison of lasers at  $\lambda \approx 633$  nm from their institute and from the BIPM.

Mr Wanchai Chinchusak (DSS, Bangkok, Thailand) stayed at the BIPM 8 March-9 April 1993 for training in the field of laser comparisons using the beat frequency technique.

Mr P. Zemanek (Institute of Scientific Instruments, Brno, Czech Republic) stayed at the BIPM 7-18 June 1993 for training in the field of stabilized lasers.

Dr T. Niebauer (Axis Instruments/Micro g, Boulder, USA) arrived on 29 September 1993: he will spend three months in the Length section to check the working of the new BIPM absolute gravimeter.

### 2.5.2 Visitors

Dr N. Brown (CSIRO, Lindfield, Australia), 14 September 1992.

Messrs L. de França Lima and L. A. Chiste Biandão (Centro Tecnico Aeroespacial, São Paulo, Brazil) and J. P. Nénon (Bureau de Normalisation de l'Aéronautique, Issy-les-Moulineaux, France), 5 October 1992.

Prof. P. Connes (Service d'Aéronomie du CNRS, Verrières-le-Buisson, France), 26 October 1992.

Dr H. Imai (NRLM, Tsukuba, Japan), 29 October 1992.

Mr A. Etchebiefere (INMETRO, Rio de Janeiro, Brazil) and Mrs L. Contier de Freitas (LNMRI, Rio de Janeiro, Brazil), 4 November 1992.

Dr Y. Kurita (NRLM, Tsukuba, Japan), 9 November 1992.

Group from ONERA (Massy-Palaiseau, France), 26 November 1992.

Dr A. Barbe (Laboratoire de Spectroscopie Moléculaire, Faculté de Reims, France), 17 December 1992.

Dr J. Faller (JILA, Boulder, USA), 28 January 1993.

Dr H. Haitjema (NMI, Delft, Netherlands), 1 March 1993.

Mrs G. Lypinski (LNE, Paris, France), 12 March 1993.

Messrs J.-J. Plateaux, A. Barbe, D. Décatoire, P. Van Der Heyden (Laboratoire de Spectroscopie Moléculaire, Faculté de Reims, France), 16 March 1993.

Prof. Ma Long Sheng (Department of Physics, East China Normal University, Shanghai, People's Rep. of China), 22-23 March 1993.

Dr P. Fisk (CSIRO, Lindfield, Australia), 26 March 1993.

Messrs Somsak Maneeratanakul and Sun Jhitkraikroun (DSS, Bangkok, Thailand), 29 March 1993.

Dr G. W. Chamberlin (NIST, Gaithersburg, USA), Mrs B.D. Sennewald, Messrs J.L. Kuehl, C.B. Randolph, T.E. Zsirai (Architects, Henningson, Durham, Richardson Inc, Alexandria, USA), 7 May 1993.

Dr A. Michaud (Université Laval, Canada), 10-14 May 1993.

Dr J. L. Hall (JILA, Boulder, USA) and Prof. Ma Long Sheng (Department of Physics, East China Normal University, Shanghai, People's Rep. of China), 18 May 1993.

Dr C. M. Sutton (MSL/IRL, Lower Hutt, New Zealand), 1 June 1993.

Dr L. Pendrill (SP, Borås, Sweden), 9 June 1993.

Dr U. Berzins (University of Latvia, Riga, Latvia), 20 July 1993.

Dr H. Talvitie (MRI, Helsinki, Finland), 20 July 1993.

### **3. Mass and related quantities (G. Girard, R. S. Davis)**

G. Girard retired as head of the Mass section in April 1993 and was replaced by R. S. Davis.

#### **3.1 Third periodic verification of national prototypes of the kilogram (G. Girard)**

Progress on the third periodic verification of national prototypes of the kilogram has been reported previously (*see* Director's reports 1989 p. 128, 1990 p. 118 and 1991 p. 156) but we now summarize the entire effort and present the final results. The third verification is now complete and is described in a detailed report by G. Girard given in appendix p. G 35.

### **3.2 The new flexure-strip balance, FB-2 (T. J. Quinn, A. Picard)**

Position control of the mass transporter of the new flexure-strip balance has been improved further by means of an additional servo-control. The beam, suspensions and pans have been assembled.

### **3.3 Surface effects on Pt-Ir mass standards (T. J. Quinn, A. Picard)**

Measurements of surface effects on Pt-Ir mass standards have been extended to vacuum. Only preliminary results have been obtained but these are, so far, difficult to interpret.

### **3.4 Anelasticity in flexures and torsion fibres (T. J. Quinn, R. S. Davis, C. C. Speake\*, W. Tew\*\*)**

To help understand anelastic phenomena, the behaviour of torsion fibres made of Cu-Be has been studied. The anelastic losses were found not to depend on load, in contrast to flexures. Studies on flexures continue.

### **3.5 Magnetic effects on weighing (R. S. Davis)**

The technique developed at the BIPM for measuring magnetic susceptibility has been adapted to check for remanent magnetization in mass standards.

### **3.6 Gravimetry (A. Sakuma)**

Further studies are being made of the properties of cube corners used as free-fall bodies in gravimeters. The International Association of Geodesy, in collaboration with the BIPM, is organizing a fourth international comparison of gravimeters to take place at the BIPM in June 1994.

## **3.7 Publications, lectures, travel: Mass section**

### **3.7.1 External publications**

1. DAVIS R. S., New method to measure magnetic susceptibility, *Meas. Sci. Technol.*, 1993, **4**, 141-147.

---

\* School of Physics and Space Research, University of Birmingham, United Kingdom.

\*\* Chemical Science and Technology Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA.



2. DAVIS R. S., KOCH W. F., "Mass and Density Determinations" In *Physical Methods of Chemistry*, Rossiter B.W. and Baetzold R.C. eds., second edition, Volume 6, Wiley & Sons (New York), 1992, 1-99.

### 3.7.2 Travel (committees, visits to laboratories and institutions)

R. S. Davis:

— visited the DFM (Lyngby, Denmark) on 21-22 September 1992 to help assess the laboratory's programme in the field of mass. While there, he presented a seminar entitled "A new method to measure the magnetic susceptibility of mass standards";

— presented a paper at INTERMAG'93 (13-16 April 1993, Stockholm, Sweden) entitled "Methods for measuring the magnetic properties of weakly magnetic materials", see *Digests of INTERNATIONAL MAGnetics Conference*, 1993, CB-04;

— presented an invited paper on the third verification of national prototypes of the kilogram at the Congress on Mass and its Measurement (15-17 September 1993, Modena, Italy): he co-chaired a technical session.

G. Girard:

— was invited to attend a meeting of EUROMET at the IMGC (Turin, Italy), 9-12 March 1993: while there, he made a presentation on the third verification of national prototypes of the kilogram.

A. Picard:

— presented an invited paper, co-authored by T. J. Quinn, on the BIPM flexure strip balance, at the Congress on Mass and its Measurement (15-17 September 1993, Modena, Italy).

W. Tew:

— with the collaboration of T. J. Quinn, R. S. Davis and C. C. Speake, gave a presentation at the April Meeting of the American Physical Society, Washington DC (USA), entitled "Anelastic loss in BeCu torsion fibers", see *Bull. APS*, 1993, **38**, 946.

### 3.8 Visitors to the Mass section

Ten representatives from Mettler S. A. (Viroflay, France), 9 October 1992.

Mr G. M. Putera (Direktorat Metrologi, Bandung, Indonesia), 28 October 1992.

Dr G. Chapman (NRC, Ottawa, Canada), 13 November 1992.

Mr D. Armitage (NPL, Teddington, UK), 14 January 1993.

Mr J. A. Robles (CEM, Madrid, Spain), 19 January 1993.

Dr C. C. Speake (Univ. of Birmingham, UK), 29 March-2 April 1993.

Dr C. M. Sutton (MSL/IRL, Lower Hutt, New Zealand), 1 June 1993.

Mrs M. C. Matilla (CEM, Madrid, Spain), 21-25 June 1993.

Mrs I. Field (CSIR, Pretoria, South Africa), 25 August 1993.

This list does not include visits made to collect national prototypes of the kilogram or visits incidental to the meeting at the BIPM in June 1993 of the CCM.

#### 4. Time (C. Thomas)

##### 4.1 International Atomic Time (TAI) and Coordinated Universal Time (UTC)

Besides the maintenance of the reference time scales TAI and UTC and the production of the *Annual Report of the BIPM Time Section for 1992*, Volume 5, published in May 1993, the work of the Time section was dominated by preparations for the 2nd Meeting of the Time Laboratories Representatives and the 12th meeting of the Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde, held at the BIPM respectively on 22-23 March 1993 and 24-26 March 1993.

Following the discussions at these two meetings, the presentation of the monthly *BIPM Circular T* has been modified. Starting from the *BIPM Circular T 62*, dated 31 March 1993, values [UTC – UTC(k)] and [TAI – TA(k)] are now reported to the nearest 1 ns (whereas they were reported to the nearest 10 ns before), except for laboratories which are not linked through GPS common-views. In addition, values of [UTC – GPS time] are printed in more compact form, and a new section has been created for the addition of the differences between the normalized frequencies of EAL and TAI.

As in previous years, conformity of the TAI scale interval with the SI second still rests almost entirely on the data of a single laboratory, the PTB, where the primary standards are much more accurate than those elsewhere. Since July 1992 the TAI frequency has remained nearly constant with respect to the PTB standards, so that only one frequency steering correction has been applied.

##### 4.2 Algorithms for time scales (J. Azoubib, C. Thomas)

The quality of the timing data used for TAI computation is rapidly improving in two ways:

— All but six of the forty-five timing centres which keep a local realization of UTC are now compared using GPS strict common views. For most of the clock comparisons used in TAI computation, the white phase noise brought about by the time comparison method is then smoothed out for averaging times shorter than ten days;

— The number of very stable clocks, such as the commercial Hewlett-Packard 5071A clocks and the newly designed hydrogen-masers, maintained by national laboratories is increasing progressively and data from them are now reported to the BIPM.

An immediate consequence of this is the improvement in the short-term stability of TAI and UTC. The basic interval of computation, at present sixty days, can thus be reduced. This, if done, will help shorten the delay of access to TAI. Given this new situation, we are now testing a new version of the algorithm ALGOS for definitive computation of TAI each month. This conforms with the requirements set by the timing community at the 12th meeting of the CCDS.

An interesting point is that, during the past year, only one frequency steering correction has been necessary to maintain the accuracy of TAI, whereas twelve such corrections were applied between June 1989 and June 1992. These corrections, in fact, compensated the global frequency drift of TAI relative to PTB CS1 and CS2, which was observed from 1986 to 1989. In addition, a study of the effects of new rules for clock weighting introduced in January 1988, shows that the proportion of highly weighted clocks must be sufficient to ensure an efficient averaging of the frequency drifts brought to the scale by the contributing elements. This optimum proportion, of about 20 %, was reached in mid-1992.

#### **4.3 Time links (W. Lewandowski, G. Petit, C. Thomas)**

The BIPM Time section is interested in any time comparison method having the potential for nanosecond accuracy. We are thus involved in the development of GLONASS, LASSO and two-way time transfer experiments, although GPS strict common-view remains the principal time transfer method used for current TAI computation.

##### **4.3.1 Global Positioning System (GPS)**

The coordinates of laboratory GPS antennas, corrected by the BIPM in June 1990 all to a common reference frame (ITRF88), are still the subject of continuous improvement. A particular effort is being made to determine differential corrections between East-Asian laboratories. For this purpose, the international GPS tracking schedule No. 21, issued by the BIPM for implementation on 25 June 1993, is reinforced for this region of the world.

Another part of our current work is the checking of differential delays between GPS receivers operating on a regular basis in collaborating timing centres or, on special request, in other laboratories [1, 14, 15]. Two exercises involving the differential calibration of GPS receivers have been performed this year: between the McDonald Observatory, Fort Davis, Texas, USA, and the Observatoire de la Côte d'Azur, Grasse, France (January 1993) and between the Observatoire de Paris, France, and the Standards and Calibration Laboratory, Wan Chai, Hong Kong (May 1993).

Work continues on testing the closure condition through a combination of three links, OP-NIST, NIST-CRL and CRL-OP [2], using ionospheric delays measured at the three sites and precise GPS satellite ephemerides

produced by different centres of the International Geodynamics Service (IGS) [3]. The deviation from closure still presents an unexplained residual bias of a few nanoseconds on daily averages. We are also developing the software necessary for the use of precise ephemerides in the current TAI computation.

Within the CCDS Group on GPS Time Transfer Standards (GGTTS), the BIPM has made a considerable effort to clarify numerous detailed points related to short-term processing of GPS data. Technical Directives from the GGTTS are now being issued with the final aim of implementing a unified software in all types of GPS time receivers [4]. The BIPM has initiated the development of a new format for GPS data files, designed to provide sub-nanosecond accuracy and intended for world-wide use from 1994.

Direct access to GPS time, as issued from Block II satellites, has been degraded (from about 50 ns to some hundreds of nanoseconds) with the permanent implementation of Selective Availability (SA). It has been shown that the Kalman prediction procedure provides an adequate solution to the problem of the precise restitution of GPS time in real-time [5] when observations are performed continuously and simultaneously over a set of four satellites. In addition, a statistical analysis of the noise brought about by SA has been carried out [6]. The results show that the effects of SA are reduced to a level below 10 ns when averaging simultaneous observations from 10 satellites tracked over 2000 s. This suggests that the commercialization of multi-channel GPS time receivers may have a considerable impact on work in time metrology.

#### **4.3.2 Global Navigation Satellite System (GLONASS)**

Values of [UTC – GLONASS time], provided from observations of GLONASS satellites by Prof. P. Daly, University of Leeds, United Kingdom, are currently published in *BIPM Circular T*.

An experiment organized jointly by the BIPM and the Russian Institute of Metrology for Time and Space (Moscow) has demonstrated that GLONASS common-view time transfer has a performance similar to that given by GPS common-view time transfer [7, 8, 9]. An international schedule of GLONASS common-view observations will be issued by the BIPM later this year.

#### **4.3.3 Two-way time transfer**

The BIPM *ad hoc* Working Group on Two-Way Satellite Time Transfer, chaired by C. Thomas, met for the second time in Graz, Austria, on 27-28 October 1992. The participants noted that, since the last meeting in 1989, great progress had been made with the two-way technique via geostationary satellites, with respect to both equipment and experience [10]. Following a decision at the 12th meeting of the CCDS, this Group became

the CCDS Working Group on Two-Way Satellite Time Transfer. Its next meeting is scheduled for October 1993 at the NPL, Teddington, UK. Meanwhile it is expected that an experimental two-way link will be established between Europe and the United States.

#### **4.3.4 Laser Synchronization from Satellite Orbit (LASSO)**

The BIPM has been involved in an experiment to compare satellite laser time transfer (LASSO) with GPS common-view time transfer between Texas and France [11]. Preliminary results show consistency between the two methods within the stated uncertainties but with a bias of about 190 ns. The bias is probably due to non-calibration of the laser equipment, a task which will be carried out during 1993. The expected accuracy of the LASSO link is below 1 ns. The precision of each observational point has already been shown to be better than 100 ps.

#### **4.4 Application of general relativity to time metrology (G. Petit, P. Wolf)**

In view of recent two-way and LASSO time transfers at precision levels below a few hundred picoseconds, with further improvements expected in the near future, a theoretical study of the relativistic corrections for time transfers at the picosecond level has been carried out. A formula that includes all terms larger than 1 ps for typical time transfers in the vicinity of the earth has been derived. The study forms part of a larger research project examining all aspects of the relationship between general relativity and metrology, and in particular the consequences of the application of general relativity to the establishment and dissemination of time scales at stabilities of some parts in  $10^{18}$ . This research is closely related to the work of the CCDS Working Group, chaired by Prof. B. Guinot, on the Application of General Relativity to Metrology which was formed at the 12th meeting of the CCDS.

#### **4.5 Pulsars (G. Petit, C. Thomas, P. Tavella\*)**

Millisecond pulsars can, in principle, be used as stable clocks to realize a time scale by means of a stability algorithm. Work has been carried out with a view to understanding how such a pulsar time scale could be realized and what implications it may have for atomic time [12]. An important feature of this work is that a pulsar time scale could allow the transfer of the accuracy of the atomic second from one epoch to another, thus overcoming some of the consequences of failures in atomic standards.

---

\* Guest worker.

Collaboration is maintained with the radio-astronomy groups observing pulsars in order to obtain real pulsar data. The Time section provided these groups with the latest version of its post-processed realization of Terrestrial Time TT(BIPM93) in February 1993, and has given other occasional support.

## 4.6 Other activities

### 4.6.1 Time laboratory (C. Thomas)

The equipment available at the BIPM now includes an Allen-Osborne Associates TTR-4P GPS time receiver. This dual-frequency multi-channel receiver, which decodes the P-code, is now under test at the BIPM. This receiver is expected to become the primary GPS time receiver of the BIPM.

Arrangements are in hand with Hewlett-Packard for the loan to the BIPM of a 5071A commercial caesium clock. These newly designed clocks are very stable, with a flicker floor level of order  $6 \times 10^{-15}$  for averaging intervals in the range from ten days to sixty days.

### 4.6.2 Very Long Baseline Interferometry (G. Petit)

Very Long Baseline Interferometry (VLBI) is one of the most precise techniques for the establishment of reference frames in geodesy and astrometry. It is also one of the applications demanding the highest stability of atomic clocks for averaging times of 1 minute to 1 day. We keep in close contact with this technique through various collaborations with the IGN (Saint-Mandé, France), the Centre National d'Études Spatiales (Toulouse, France) and the Observatoire de Paris. We also participate in the organization of VLBI observations on millisecond pulsars.

## 4.7 Publications, lectures, travel: Time section

### 4.7.1 External publications

1. IMAE M., AIDA M., GOTO T., MIKI C., LEWANDOWSKI W., THOMAS C., PETIT G., GRANVEAUD M., Calibration Experiments of GPS Time Transfer Receivers and Ionospheric Delay Measuring Receivers between Japan and France, *Proc. 7th EFTF*, 1993, 409-412.
2. LEWANDOWSKI W., PETIT G., THOMAS C., Precision and Accuracy of GPS Time Transfer, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**, 474-479.
3. PETIT G., LEWANDOWSKI W., THOMAS C., Precise GPS ephemerides for time transfer, *Proc. 7th EFTF*, 1993, 417-421.

4. THOMAS C. (on behalf of the GGTTs members), Progress on GPS standardization, *Proc. 24th PTTI*, 1992, 17-30.
5. THOMAS C., Real-time Restitution of GPS Time through a Kalman Estimation, *Metrologia*, 1992, **29**, 397-414.
6. THOMAS C., Real-time restitution of GPS time, *Proc. 7th EFTF*, 1993, 141-146.
7. LEWANDOWSKI W., PETIT G., THOMAS C., CHERENKOV G. T., KOSHELYAEVSKY N. B., PUSHKIN S. B., Comparison of GPS and GLONASS time transfers, *Proc. 24th PTTI*, 1992, 47-58.
8. LEWANDOWSKI W., MOUSSAY P., CHERENKOV G. T., KOSHELYAEVSKY N. B., PUSHKIN S. B., GLONASS common-view time transfer, *Proc. 7th EFTF*, 1993, 147-151.
9. DALY P., KOSHELYAEVSKY N. B., LEWANDOWSKI W., PETIT G., THOMAS C., Comparison of GLONASS and GPS Time Transfers, *Metrologia*, 1993, **30**, 89-94.
10. KIRCHNER D., RESSLER H., GRUDLER P., BAUMONT F., LEWANDOWSKI W., HANSON W., KLEPCZYNSKI W., UHRICH P., Comparison of GPS and Two-Way Satellite Time Transfer Over a Baseline of 800 km, *Metrologia*, 1993, **30**, 183-192.
11. BAUMONT F., GRUDLER P., VEILLET C., WIAANT J., LEWANDOWSKI W., PETIT G., Preliminary report on the comparison of LASSO and GPS time transfer, *Proc. 7th EFTF*, 1993, 641-643.
12. PETIT G., THOMAS C., TAVELLA P., An ensemble pulsar time, *Proc. 24th PTTI*, 1992, 73-86.
13. LEWANDOWSKI W., Most recent advances in accurate time transfer, *Proc. Conference Computer Aided Metrology* (in Polish), Volume **2/A**, Warsaw, PAN, 1993, 13-43.

#### **4.7.2 BIPM reports**

14. LEWANDOWSKI W., THOMAS C., IMAE M., Determination of differential time corrections between GPS time receivers located at the Observatoire de Paris and the Communications Research Laboratory of Tokyo, *Rapport BIPM-93/4*, 1993, 12 pages.
15. THOMAS C., MOUSSAY P., Determination of differential time corrections between GPS time receivers located at the Observatoire de Paris and the Standards and Calibration Laboratory of Hong Kong, *Rapport BIPM-93/5*, 1993, 12 pages.

#### **4.7.3 Lectures and presentations**

W. Lewandowski attended meetings of the Civil GPS Service Interface Committee in Albuquerque (USA), on 14-15 September 1992, and in Falls

Church (USA), on 25-26 January 1993, where he gave presentations on recent studies in GPS, GLONASS, LASSO and two-way time transfers. He gave presentations on most recent research concerning various satellite time transfer techniques during the 2nd Meeting of the Time Laboratories Representatives, held at the BIPM on 22-23 March 1993. He also gave a lecture on 24 May 1993, during a conference on Computer Aided Metrology held in Warsaw (Poland).

G. Petit made presentations on GPS and pulsar observations during the 2nd Meeting of the Time Laboratories Representatives, held at the BIPM on 22-23 March 1993. He gave two presentations, on pulsar time and on VLBI observations of millisecond pulsars, at the Forum on pulsars in Meudon (France), on 26 October 1992. He also gave a lecture on pulsar time and atomic time at the Naval Research Laboratory in Washington DC (USA), on 4 December 1992.

C. Thomas made presentations on different aspects of the work in the Time section during the 2nd Meeting of the Time Laboratories Representatives, held at the BIPM on 22-23 March 1993. She also gave several lectures on time at the Standards and Calibration Laboratory, Wan Chai, Hong Kong, on 4-6 May 1993, during the Asia/Pacific Metrology Programme (APMP) Seminar on GPS Common-View Reception.

P. Wolf made a presentation on TAI as a realization of terrestrial time TT as defined by the IAU in its resolution A4 (1991) during the 2nd Meeting of the Time Laboratories Representatives, held at the BIPM on 22-23 March 1993.

#### **4.7.4 Travel (committees, visits to laboratories and institutions)**

W. Lewandowski visited:

— Albuquerque (USA), 16-18 September 1992, to attend the 5th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS-92);

— Graz (Austria), 27-28 October 1992, to participate in the 2nd meeting of the BIPM *ad hoc* Working Group on Two-Way Time Transfer;

— McLean (USA), 1-3 December 1992, to attend the 24th PTTI meeting;

— Fort Davis (USA), 4-8 December 1992, to install GPS time equipment required for the LASSO experiment at the McDonald Observatory;

— Neuchâtel (Switzerland), 16-17 March 1993, to attend the 7th European Frequency and Time Forum and to participate in the LASSO Coordinating Group meeting.



G. Petit visited:

— Toulouse (France), 14-15 October 1992, to work on the design and development of a VLBI correlator at the Centre National d'Études Spatiales;

— Meudon (France), 26 October 1992, to attend a Forum on pulsars at the Observatoire de Meudon;

— Princeton (USA), 30 November 1992, to visit Princeton University for discussions on pulsar data analysis;

— McLean (USA), 1-3 December 1992, to attend the 24th PTTI meeting;

— Washington DC (USA), 4 December 1992, to visit the Naval Research Laboratory for discussions on pulsar data analysis;

— Neuchâtel (Switzerland), 16-17 March 1993, to attend the 7th European Frequency and Time Forum.

C. Thomas visited:

— Graz (Austria), 27-28 October 1992, to chair the 2nd meeting of the BIPM *ad hoc* Working Group on Two-Way Time Transfer;

— Toulouse (France), 2 November 1992, to participate in a meeting on GPS Time Transfer held at the Centre National d'Études Spatiales;

— Neuchâtel (Switzerland), 16-17 March 1993, to chair the session on Time Transfer at the 7th European Frequency and Time Forum;

— Hong Kong, 1-9 May 1993, to participate in the APMP Seminar on GPS Common-View Reception.

P. Wolf visited:

— Meudon (France), 26 October 1992, to attend the Forum on pulsars at the Observatoire de Meudon;

— London (UK), 9-12 December 1992, to work with Prof. I. W. Roxburgh at Queen Mary and Westfield College;

— Neuchâtel (Switzerland), 16-17 March, to attend the 7th European Frequency and Time Forum;

— Bures-sur-Yvette (France), 25 May 1993, to attend a day of discussions on "Experimental Gravitation" organized by the Groupe de Recherche sur la Gravitation;

— Paris (France) to attend lecture courses on General Relativity at the École Normale Supérieure and on Reference Frames in Astronomy at the Observatoire de Paris.

#### 4.8 Activities related to external organizations

W. Lewandowski participates in the work of the IUGG.

G. Petit participates in the work of IAU, in which he is a member of the Working Group on Astronomical Standards. He is a member of the Scientific Council of the GRGS (France), and a member of the Comité National Français de Géodésie et Géophysique.

C. Thomas is a member of the Comité National Français de Géodésie et Géophysique.

## 4.9 Visitors to the Time section

### 4.9.1 Guest worker

Dr P. Tavella (IEN, Turin, Italy), visited on one occasion, 3-13 November 1992, to continue her collaboration with the BIPM Time section on pulsars.

### 4.9.2 Visitors

Mr D. Davis (NIST, Boulder, USA), 15 October 1992.

Mr J. Danaher (3S Navigation, Laguna Hills, USA), 9-10 November 1992.

Dr S. Stein (Timing Solutions Corporation, Boulder, USA), 12 November 1992.

Dr M. Staniewski (PKNM, Warsaw, Poland), 23 November 1992.

Dr R. Barillet (LHA, Orsay, France), 30 November 1992.

Dr G. Saxena (NPLI, New Delhi, India), 15 December 1992.

Mr B. Waitzmann (Équipements Services Techniques, Ris-Orangis, France), 16 February 1993.

Dr T. Fayard (CNES, Toulouse, France), 15 March 1993.

Dr M. A. Weiss (NIST, Boulder, USA), 19 March 1993.

Dr D. Sullivan (NIST, Boulder, USA), 29 March 1993.

Mr M. Chow (SCL, Hong Kong), 22 April 1993.

Mr O. Grimaud (Hewlett-Packard, Les Ulis, France), 8 June 1993.

## 5. Electricity (T. J. Witt)

### 5.1 Summary of the work of the Electricity section in 1993

The highlights of this year's activities include the successful setup and testing of a 10 V Josephson array standard (agreement of better than 1 part in  $10^8$  with respect to our 1,018 V Josephson standard and the 1,018 V to 10 V comparator). Two more international comparisons of Josephson-array voltage standards were completed and the results demonstrate relative differences no greater than 7 parts in  $10^{10}$ . A precise comparison of half-integer step voltages with the usual integer step voltages of a second array confirms the Josephson relation for half-integer steps to 3 parts in  $10^{10}$ .

A transportable quantum Hall effect (QHE) resistance standard has been set up. It is designed to be taken to other laboratories for comparison of QHE systems. Tests show that, with it, resistors can be calibrated with respect to  $R_{K-90}$  with an uncertainty of a few parts in  $10^9$ . A novel

technique has been devised, and experimentally verified, for connecting QHE samples in series and parallel combinations to yield a total resistance having metrological accuracy.

To establish publicly documented traceability of resistance and voltage standards a programme has begun which will make bilateral comparisons using conventional travelling standards available to all national laboratories. This programme explicitly includes those laboratories that do not directly use reference standards based on the Josephson effect or the QHE. Three laboratories have already participated in the programme.

## 5.2 Electrical potential

### 5.2.1 Josephson effect (D. Reymann)

International comparisons of Josephson-array voltage standards were an important part of our work this year. We transported our equipment to the OFMET (Switzerland) in November 1992, and to the VSL/NMi (Netherlands) in March 1993. Direct and indirect comparisons of array voltages were carried out using the BIPM voltage transfer device and the BIPM null detector. In addition, measurements of Zener-diode based standards were compared. We have developed new methods to improve the accuracy of measurements which simulate the way Josephson-array voltage standards are routinely used in the national metrology laboratories. One method is to measure the voltage of the BIPM transfer device with each of the two independent systems, including their detectors. The other uses a new transfer device built by the BIPM. In this, a 10 V Zener standard stabilizes the current through a resistive voltage divider giving a reversible 1,018 V output with a source impedance of about 100  $\Omega$ . In this work, it is the drift of the standards themselves, not thermal EMFs, that limits the type A uncertainty. The latter may be as low as 1 nV when the measurements are made rapidly and in a symmetric way.

The results of these comparisons are listed below, expressed as the difference between the values that would be attributed to a standard cell by the different instruments. The uncertainties are of combined type A and type B.

At the OFMET :

$$U_{\text{OFMET}} - U_{\text{BIPM}} = -0,7 \text{ nV}, \quad \sigma = 0,3 \text{ nV}.$$

At the VSL :

$$U_{\text{VSL}} - U_{\text{BIPM}} = 0,2 \text{ nV}, \quad \sigma = 0,2 \text{ nV}.$$

Comparisons with other national laboratories are foreseen in 1994.

Another comparison was carried out at the BIPM with the BNM/LCIE. This was of a special type as the array from the BNM/LCIE presented half-

integer steps. The purpose of the comparison was to determine the level of accuracy of the Josephson relation for half-integer steps. No deviation larger than the uncertainty of the measurement, 0,3 nV, was observed.

This year the NIST made a long-term loan to the BIPM of a 10 V array fabricated at the Boulder laboratory. The first measurements were carried out using a new Gunn diode source giving 100 mW at around 75 GHz. Measurements of 10 V Zener standards obtained with the array are compared below with ones derived from our 1,018 V Josephson standard and our 1,018 V to 10 V comparator. The uncertainties are of type A only:

$$\begin{aligned} U_{Z(10 \text{ V array})} &= 9,999\,944\,36 \text{ V}, & \sigma &= 0,02 \text{ } \mu\text{V}, \\ U_{Z(10 \text{ V array} + \text{comparator})} &= 9,999\,944\,31 \text{ V}, & \sigma &= 0,12 \text{ } \mu\text{V}. \end{aligned}$$

These results are very satisfactory in that they imply a level of error in the 1,018 V to 10 V comparator of less than 1 part in  $10^8$ .

We thank the NIST, particularly the group of C. A. Hamilton, for making the 10 V array available to us. We thank Advantest, Inc. of Tokyo, Japan who gave the BIPM a third phase lock loop driver circuit to be used in our new 10 V array standard. This circuit was designed and built by H. Yoshida, an Advantest engineer and guest worker at the ETL.

We also thank the ETL for the gift of a Nb/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nb one-volt array made available through Y. Sakamoto.

## 5.2.2 Other activities

Although the relative humidity in the voltage laboratory is controlled at about 50 %, variations between winter and summer can amount to several per cent. The 1,018 V outputs of some Zener-diode based standards show long-term voltage variations correlated with humidity. A systematic study is now under way to elucidate this effect.

## 5.3 Electrical impedance (F. Delahaye)

### 5.3.1 Development of a transportable resistance standard based on the quantum Hall effect

A transportable quantum Hall effect (QHE) resistance standard has been assembled and successfully tested. It consists essentially of a set of QHE samples and a cryostat of relatively compact size which contains a superconducting magnet, a low-temperature insert and a resistance-ratio bridge. The superconducting magnet can provide maximum magnetic flux densities of 11 T at 4,2 K and 13 T at 2,2 K. The low-temperature insert provides a temperature lower than 1,5 K in the sample chamber. The bridge is based on a room-temperature alternating current comparator operating at 1 Hz [5] and allows the calibration of 1  $\Omega$ , 100  $\Omega$  and 10 000  $\Omega$  resistance

standards in terms of  $R_{K-90}$  with an uncertainty of order a few parts in  $10^9$ . The BIPM plans to transport this equipment to interested CCE laboratories to carry out direct bilateral comparisons of QHE resistance standards. This is an approach similar to that adopted by the BIPM for the comparison of Josephson array voltage standards.

### **5.3.2 Series and parallel connection of quantum Hall effect devices**

The availability at the BIPM of a number of nearly identical QHE samples, fabricated by the Laboratoires d'Électronique Philips [6], motivated a study of the possibility of connecting QHE devices in series or parallel to yield resistances of metrological accuracy, which are multiples or submultiples of the quantized resistances. Beginning with an equivalent circuit model we calculated that, by using the technique of multiple links to form the connections, the effects of the contact resistance to the two-dimensional electron gas can be rendered negligible. Careful experiments confirm the results of these calculations [7]. Metrological applications include the realization of accurate reference standards which are multiples or sub-multiples of the individual quantized Hall resistance values and the precise comparison of quantized Hall resistances with a resistance bridge.

### **5.3.3 Capacitance measurements**

A new project has begun with the objective of calibrating 10 pF capacitance standards in terms of the quantized Hall resistance using a capacitance bridge and a quadrature bridge. This year we developed a capacitance bridge for linking 100 pF and 2000 pF capacitance standards to 10 pF standards. Special temperature-controlled enclosures, with temperature stability of order 1 mK, were built for two 100 pF and two 2000 pF standards. Future work will include the construction of a quadrature bridge, operated at an angular frequency of approximately  $10^4$  rad/s, linking the 2000 pF capacitors to the quantized Hall resistance and a study of the effect of frequency on the quantized Hall resistance.

## **5.4 Bilateral comparisons of electrical standards at the BIPM**

The continuing programme of on-site comparisons of Josephson standards and the new programme of international comparisons of QHE systems will provide the best technical means to assure traceability and coherence among laboratories equipped with these quantum standards. However, the majority of national metrology laboratories in the member states rely on the BIPM or some of the bigger national laboratories to provide the calibrations necessary to assure the stability in time of their national representations of the ohm and the volt. Following discussions in the 1992 CCE meeting, it became clear that calibrations alone do not satisfy the needs of traceability felt by some of the laboratories. To help

meet these needs, we are now offering all national laboratories an optional alternative to calibrations so that they may link their reference standards to those of the BIPM. We refer to this new programme as one of "bilateral comparisons" because the procedures are nearly the same as those used for international comparisons of resistance:

1) the owner laboratory measures the travelling standards with respect to its national reference standard both before and after shipment to the BIPM and communicates the values, along with estimated uncertainties, to the BIPM;

2) the BIPM measures the travelling standards, provides values and uncertainties with respect to its Josephson or QHE reference standards, and calculates the value and uncertainty of the difference between the values assigned to the travelling standards by the two laboratories;

3) the laboratory informs the BIPM of any modification it intends to make in its national reference standard as a result of the comparison;

4) with the participant's agreement, the BIPM publishes the results of the comparison along with an indication of any modification of its national reference standard in the *Procès-verbaux of the CIPM and Metrologia*.

To date, three laboratories that presently maintain their electrical standards via comparisons with the BIPM have participated or are now participating in the new bilateral comparison programme. For one, EOLAS (Dublin, Ireland), the final results of a bilateral comparison of voltage standards gives the difference between the values that would be attributed to a 10 V reference standard as:

$$U_{(10\text{ V EOLAS})} - U_{(10\text{ V BIPM})} = 0,7\ \mu\text{V}, \quad \sigma = 3,2\ \mu\text{V},$$

i.e., the relative difference is 7 parts in  $10^8$ .

## 5.5 Measurements of noise in voltage standards

We have begun a study of the power spectral density of noise in order to examine the limitations imposed by noise on our voltage standards and the equipment used to compare them. So far, at the level of 1,018 V, we have studied noise in comparisons of a Josephson array with standard cells, with our voltage transfer standard and Zener diode standards, and in comparisons of the 10 V array with a Zener standard. Similar measurements were made on the circuits we use for calibrating cells and Zener standards. By studying the detectors used in these different applications we have been able to determine, rather precisely, the equivalent noise bandwidths. We find that in cell comparisons the noise voltage is the same as that measured in wirewound resistors having a resistance equal to the internal resistance of the cells. In battery operated 1,018 V Zener standards, the noise power spectral density is greater, by a factor of 5 to 10, than that

of standard cells and the power spectral density decreases with frequency more slowly than  $1/f$ .

## 5.6 Comparisons and routine calibrations

This year, routine calibrations were carried out on the following systems: bare cells for Austria; Zener diode standards at 1,018 V and 10 V for Austria, Belgium, Brazil, Ireland and Portugal;  $1\ \Omega$  resistors for Spain, Belgium, Portugal, Brazil, Austria; and  $10\ \text{k}\Omega$  resistors for Denmark, Spain and Austria.

## 5.7 Publications, lectures, travel: Electricity section

### 5.7.1 External publications

1. REYMANN D., IWASA A., YOSHIDA H., ENDO T., WITT T. J., Comparison of Josephson Voltage Standards of the Electrotechnical Laboratory and the Bureau International des Poids et Mesures, *Metrologia*, 1992, **29**, 389-395.
2. REYMANN D., WITT T. J., International Comparisons of Josephson Array Voltage Standards, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**, 596-599.
3. STEINER R. L., CLARK A. F., KISER C., WITT T. J., REYMANN D., Accuracy Comparisons of Josephson Array Systems, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 1993, **3**, 1874-1877.
4. REYMANN D., WOOD B., WITT T. J., Comparison of Josephson Voltage Standards of the National Research Council of Canada and the Bureau International des Poids et Mesures, *Metrologia*, 1993, **30**, 109-111.
5. DELAHAYE F., BOURNAUD D., Accurate AC Measurements of Standard Resistors between 1 Hz and 20 Hz, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**, 287-291.
6. PIQUEMAL F., GENEVÈS G., DELAHAYE F., ANDRÉ J. P., PATILLON J. N., FRIJLINK P., Report on a Joint BIPM-EUROMET Project for the Fabrication of QHE Samples by the LEP, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**, 264-268.
7. DELAHAYE F., Series and parallel connection of multi-terminal quantum Hall effect devices, *Journal of Applied Physics*, 1993, **73**, 7914-7920.
8. WITT T. J., DELAHAYE F., REYMANN D., The Role and Activities of the Electricity Section of the BIPM, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**, 247-250.

9. GENEVÈS G., LO-HIVE J.-P., REYMANN D., WITT T. J., Observation and Precise Measurement of Subharmonic Voltage Steps on a 1V Josephson Junction Array, *Metrologia*, 1993, **30**, 511-512.

### **5.7.2 Lectures and presentations**

T. J. Witt gave a lecture entitled "Recent activities in the Electricity section of the BIPM" at the VSL, Delft (Netherlands), on 18 March 1993.

D. Reymann and F. Delahaye attended the EUROMET meeting of experts on the quantum Hall effect and Josephson array voltage standards at the DFM, Lyngby (Denmark), 1-2 June 1993. F. Delahaye presented news from the BIPM concerning the metrological use of the quantum Hall effect. D. Reymann described the results and experience gained in BIPM comparisons with national laboratories.

D. Reymann attended the workshop on "Materials and Instrumentation" of the École Doctorale "Structure Information Matière et Matériaux" of the university of Caen (France), 17-18 May 1993, where he presented a lecture entitled "Utilisation de l'effet Josephson dans la métrologie du volt".

T. J. Witt attended the XXIVth General Assembly of the URSI in Kyoto, Japan, 30 August-1 September 1993. On 31 August he delivered an invited lecture entitled "Quantum Metrology of the Volt: the Josephson-Effect Reference Standard", *see URSI Abstracts* p. 16. He visited the ETL and the NRLM, Tsukuba, 1-9 September 1993. On 7 September he delivered a lecture entitled "The BIPM Programs to Compare Josephson-Effect Standards and Quantum Hall-Effect Standards via Transportable Instruments".

### **5.7.3 Travel (committees, visits to laboratories and institutions)**

T. J. Witt attended the 5th meeting of EUROMET contact persons in electricity at the DFM, Lyngby (Denmark), 13-14 October 1992. He reviewed the activities of the Electricity section of the BIPM emphasizing the results of the 1990 resistance comparison, comparisons of Josephson-array voltage standards and the scheme for bilateral comparisons.

T. J. Witt and D. Reymann visited: the OFMET, Wabern (Switzerland), 9-13 November 1992; the VSL/NMi, Delft (Netherlands), 8-12 March 1993, for comparisons of Josephson arrays, visits and discussions with colleagues on voltage and resistance metrology and on Josephson arrays.

T. J. Witt went to Oxford Instruments, Oxford (UK), on 10 December 1992 to discuss ways of modifying a standard cryostat to allow it to be transported horizontally with a superconducting magnet fitted. He participated in tests of the cryostat and magnet at Oxford on 22 March 1993.

T. J. Witt and D. Reymann went to the LCIE, Fontenay-aux-Roses (France), on 14 January 1993, to conduct measurements of the output



power from 72 GHz to 75 GHz of the new Gunn diode source and, on 23 February 1993, for spectral analysis of Gunn diode sources.

F. Delahaye attended a meeting of the IEC working group on the vocabulary of general concepts in electrotechnology in London (UK), 16-19 March 1993.

T. J. Witt attended the 30th anniversary celebration of the Centre d'Étalonnage Métrologie Électrique at the LCIE, Fontenay-aux-Roses (France), on 3 June 1993.

## **5.8 Activities related to external organizations**

F. Delahaye is a member of the IEC working group on General Concepts in Electrotechnology.

## **5.9 Visitors to the Electricity section**

### **5.9.1 Guest workers**

Messrs J.-P. Lo-Hive and G. Genevès came to the BIPM for Josephson array comparisons, on 7 and 10 May 1993.

### **5.9.2 Visitors**

Dr E. T. Frantsuz (VNIIM, St. Petersburg, Russian Federation), 6 November 1992, accompanied by Dr G. Genevès and Dr F. Piquemal (LCIE, Fontenay-aux-Roses, France).

Mr Raso (CEM, Madrid, Spain), 23 November 1992.

Ms I. Godinho (LNETI, Lisbon, Portugal), 1-5 March and 4 June 1993.

Dr P. Klenovsky, Director (CMI, Brno, Czech Republic), 8 April 1993.

Messrs L.M. Ogino and J.R. da Silva (INMETRO, Rio de Janeiro, Brazil), 24-27 May 1993.

Messrs Pin Peter Chang and Chin-Ping Liang (Industrial Technology Research Institute, Hsinchu, Taiwan), 2 June 1993.

Miss M. Chambon (BNM, Paris, France) and Dr G. Genevès (LCIE, Fontenay-aux-Roses, France), 8 June 1993.

Dr C. Rhee and Dr D. Chi (KRISS, Taejon, Rep. of Korea), 10 September 1993.

Dr K. H. Yoo (KRISS, Taejon, Rep. of Korea), 16-17 September 1993.

## **6. Radiometry, photometry, thermometry and pressure (J. Bonhoure)**

### **6.1 Radiometry (R. Köhler, R. Goebel)**

The international comparison of spectral responsivity of silicon photodiodes continued throughout the year. A total of fourteen national laboratories has participated in the measurements so far. Each laboratory

received a set consisting of four detectors, three Hamamatsu S-1337-1010BQ photodiodes and one trap detector, of BIPM design, assembled from three similar photodiodes. A fifteenth set was retained at the BIPM for use as a reference. The relative spectral responsivity of all photodiodes has been measured at least twice at each of nineteen wavelengths in the range 248 nm to 1000 nm. Other measurements, to provide more detailed characterization of the photodiodes, were made earlier.

The participants had five months to calibrate the detectors in terms of absolute spectral responsivity and to return them to the BIPM with the results of the calibration. On return, as a check against damage and drifts in responsivity, all detectors were subjected to the same series of measurements as were made before they were sent to the participants. The photodiodes and the trap detectors generally showed excellent stability over the period of the comparison. Only in the UV region was the stability somewhat degraded, apparently an ageing effect caused by irradiance at shorter wavelengths. After completion of the measurements, the data were analyzed. The results will be available in 1994 in the form of a BIPM report.

When the comparison was already well under way, four other laboratories expressed interest in participating in the comparison. As no spare detector sets were available it was decided that, after completion of the first round of measurements, detectors returned from the first round should be sent to other participants. The total international comparison will thus include scales from a total of eighteen national laboratories, plus the BIPM scale.

Recent improvements in the accuracy of radiometry have led to tighter limits being placed on all associated physical phenomena. One such phenomenon is diffraction. Some studies have already been performed (*see* Director's report 1991, p. 180). The problem has been reviewed and further theoretical work has been carried out in the course of the year. The result of this study is a simple formula which allows the numerical calculation of diffraction effects from arbitrarily shaped apertures even for points very close to the aperture, a condition in which the classical formula (Fresnel approximation) is no longer valid. The results of these calculations were confirmed by experimental work done with the laser-based equipment in the radiometry laboratory.

The residual reflectivity of the trap detectors used for the international comparison has also been measured in order to estimate their external quantum efficiency. If the external quantum efficiency is known, these traps can be used as spectrally flat detectors covering at least a part of the spectrum.

As the accuracy of radiometric calibrations improves, the effects of diffuse reflectivity become progressively more important. Measurements of diffuse reflectivity from detector surfaces have therefore continued, using a small integrating sphere to assess different types of photodiodes.

A new kind of trap detector, called a tunnel trap, has been developed at the NIST. Its construction has been copied in the BIPM workshop and we are currently engaged in characterizing its behaviour in radiometry.

Studies of a photodiode used at the BESSY (Berlin) for measurements of soft x-ray radiation have been performed. These show that this type of photodiode can be self-calibrated at visible wavelengths and its absolute spectral responsivity can be measured at wavelengths down to 250 nm using standard radiometric methods. When combined with the measurements done at the synchrotron, this study shows that the photodiode can be calibrated over the wavelength range 1 nm to 1000 nm.

## **6.2 Thermometry and pressure**

Measurements in thermometry have been limited to verification of the sensors used in the Radiometry section and to the calibration of a mercury thermometer which is used as a reference in the mano-barometer.

The renovation of the mano-barometer was completed to schedule: the company OMICRON cleaned the measurement chambers, the auxiliary manometer and the electro-magnetic valves. This company also cleaned and distilled the mercury. All optics have been cleaned and aligned.

All auxiliary equipment for the mano-barometer has been completely renewed by the BIPM. This includes the vacuum system, mercury reservoirs, pipework and control system for the measurements. After being out of commission for just four months, pressure gauges from the other sections of the BIPM can once again be calibrated. The high contrast of the fringes now obtained indicates that the alignment of the interferometer used to locate the menisci has been correctly executed.

## **6.3 Calibration work**

Standard lamps of luminous intensity have been calibrated for the VSL (Netherlands) and the INMETRO (Brazil).

## **6.4 Publications, lectures, travel: Radiometry, photometry, thermometry and pressure section**

### **6.4.1 Lectures and presentations**

R. Köhler attended:

— the conference "New Developments and Applications in Optical Radiometry IV" in Baltimore (USA) on 5-9 October 1992. He also visited the NIST radiometry laboratories;

— the Council of Optical Radiation Measurements (CORM 93) in Gaithersburg (USA) on 18-21 May 1993. He gave an invited presentation entitled "Optical Radiometry at the BIPM".

#### **6.4.2 Travel (committees, visits to laboratories and institutions)**

R. Köhler visited:

— Grenoble (France), 11-12 February 1993, for discussions at the European Synchrotron Radiation Facility;

— Delft (Netherlands), 26-29 May 1993, to take detectors to the VSL for the international comparison and to visit the radiometry and photometry laboratories. He also gave a lecture on radiometry at the BIPM;

— Paris (France), 26 May 1993, to act as a member of the jury for an engineering thesis at the CNAM;

— Turin (Italy), 2-4 June 1993, to take detectors to the IEN for the international comparison and to visit the radiometry and photometry laboratories.

R. Goebel visited:

— Grenoble (France), 11-12 February 1993, for discussions at the European Synchrotron Radiation Facility.

#### **6.5 Activities related to external organizations**

J. Bonhoure acts as the expert in French language of the Technical Committee 7.06 "Lighting terminology" of the International Commission on Illumination (CIE).

R. Köhler has joined the CIE Technical Committee 2.29 "Measurement of Detector Linearity".

#### **6.6 Visitors to the Radiometry, photometry and thermometry and pressure section**

Mr Wanchai Chinchusak (DSS, Bangkok, Thailand), 7 April 1993.

Mr Y. Hermier (INM, Paris, France), 14 May 1993.

Mr J. Kryl (CMI, Prague, Czech Republic), 28 May 1993.

Mr H. W. Reyn (VSL, Delft, Netherlands), 7-11 June 1993.

Mrs M. Velloso (INMETRO, Rio de Janeiro, Brazil), 9-26 June 1993.

#### **7. Ionizing Radiations (J. W. Müller)**

Recent meetings of the three sections of the CCEMRI and the participation of staff in international conferences have provided an opportunity to see our work in a larger context, in terms both of services and achievements. The result is encouraging: in some special fields, the BIPM can even claim a leading position.

## 7.1 Dosimetry (M. Boutillon and V. D. Huynh)

### 7.1.1 Gamma rays and x rays (M. Boutillon and A.-M. Perroche)

#### i) *Change in the air kerma calibration factor of secondary standards with the beam spectrum of $^{60}\text{Co}$ sources*

Measurements of air kerma can be performed at the BIPM in the beams of two  $^{60}\text{Co}$  sources, the activities of which are, in late 1993, 0,8 TBq and 90 TBq. The first source is practically free in air and the second is located in a teletherapy head. The scattered components of the two beams, in terms of energy fluence, are 8 % and 14 %, respectively. The conditions are excellent (same standard, same location and same measuring system) for evaluating the variation of the calibration factor of a secondary standard with the  $^{60}\text{Co}$  beam quality.

Six transfer chambers have been used (Shonka and NE 2561 types). The difference between the calibration factors measured in the two beams is in the range 0,1 % to 0,2 %, depending on the chamber. This is more than twice the estimated uncertainty ( $\sigma = 0,05$  %) and puts in evidence a small, but real, dependence of the chamber response on the  $^{60}\text{Co}$  beam used. In international comparisons of air kerma standards, this influence contributes to the overall uncertainty.

#### ii) *Stability of the $^{60}\text{Co}$ source (90 TBq)*

The 90 TBq source was first used for the measurement of absorbed dose to water  $D_w$  and (*see* Director's report 1991) a small but significant decrease, 0,1 % over two years, has been observed. To avoid the possible effect of humidity on the perspex envelope of the standard previously used, a new envelope in polythene is now used. The correction for its presence has been determined experimentally and a long series of measurements of  $D_w$ , performed with each of the envelopes, shows a difference of 0,02 %. Experimental checks were also made to ensure that the irradiation has no degrading effect on the transmission of the front perspex plate of the phantom.

This source is also used for measurements of absorbed dose to graphite and the results obtained during the past two years show a similar decrease in both graphite and water. This indicates that the drift is due either to the source itself, which may contain radioactive impurities, or to the measuring system. Further checks will be made.

#### iii) *Testing of the IAEA code for the determination of absorbed dose to water*

Until recently, the value of  $D_w$  was deduced by calculation from measurements in air. Many codes of calculation have been established for this purpose and are used throughout the world. Some primary laboratories, and the BIPM, have developed standards for the determination of water

absorbed dose, so a test of these codes is now possible. The IAEA code, which is widely used, has been chosen for the present work.

The check was made by calibrating eighteen transfer chambers of different types under the reference conditions, both in air and in water. The results are consistent with the uncertainty claimed by the IAEA code, of order 1 % or better. Points to note are:

— For a given type of chamber, the experimental value of the conversion factor  $C_A^K$ , i.e. the ratio of the calibration factors in water and in air, can vary by up to 0,7 %. This is a significant discrepancy, and is due to differences in the construction of the chambers which are not taken into account in the calculation code.

— Results are better for chambers with a thin electrode than for those with a large one. This may imply that the code oversimplifies calculation of the correction for the air of the cavity. The variation of  $C_A^K$  with depth in water, measured for ten different chambers, confirms this conclusion.

Two other laboratories, the PTB and the BEV, have performed similar checks and report comparable results. A detailed comparison of their data with those of the BIPM has yet to be made.

#### iv) *Comparisons and calibrations performed at the BIPM*

The UDZ and the BIPM have carried out a comparison of air kerma standards in the  $^{60}\text{Co}$  gamma radiation. The UDZ standard is a graphite cavity chamber constructed at the OMH. The correction factors for this standard were determined at the UDZ. The result is  $K_{\text{UDZ}}/K_{\text{BIPM}} = 0,9992 \pm 0,0023$ .

Two ionization chambers of the UDZ have also been calibrated in terms of air kerma in the  $^{60}\text{Co}$  gamma radiation. The calibration factors are higher than those determined at the UDZ by 0,16 % and 0,07 %. These values are compatible with differences between the standards. One of the chambers has also been calibrated in terms of absorbed dose to water.

Two ionization chambers used as secondary standards at the STUK have been calibrated in terms of air kerma in the low-energy x-ray range. One had already been calibrated in 1985 and the variation of its calibration factor is less than 0,3 %.

The secondary standards of the STUK, the SRPI and the LNMRI have been calibrated, in the medium-energy x-ray range, in terms of air kerma and, in the  $^{60}\text{Co}$  gamma radiation, in terms of air kerma and absorbed dose to water.

Three BIPM ionization chambers with tissue-equivalent wall, used in an international comparison of neutron dosimetry, have been re-calibrated in the  $^{60}\text{Co}$  gamma radiation. Their calibration factors continue to change: in the past ten years they have increased by 1 %.

Active collaboration with the IAEA has continued. The IAEA has developed a dosimetry system for the SSDL network, which now comprises

seventy-two laboratories throughout the world, by organizing comparisons of absorbed dose to water using thermoluminescent dosimeters. Three sets of three dosimeters were irradiated (2 Gy) for the IAEA in the BIPM water phantom in November 1992 and March 1993. The results of these irradiations,  $D_{IAEA}/D_{BIPM} = (1,001 \text{ to } 1,003) \pm 0,006$ , are satisfactory.

v)  $^{137}\text{Cs}$  source

Installation of the  $^{137}\text{Cs}$  source is now under way. The source (about 1 TBq) will be placed in a container specially constructed by the Société Atlantique de Techniques Avancées, Nantes, France. For the measurement of air kerma the beam defined by the collimator will have a diameter of 10 cm at 1 m from the source. For the measurement of ambient dose equivalent, a larger collimator will define a beam of 65 cm diameter at 3 m. A metallic framework, constructed at the BIPM, will support the source container and the translation tables on which the ionization chambers will be placed.

## 7.1.2 Neutron measurements (V. D. Huynh)

i) *International comparison of neutron fluence measurements*

An international comparison of neutron fluence measurements at 24,5 keV, organized by the BIPM under the auspices of Section III (Neutron measurements) of the CCEMRI, is in progress. The timetable for the six participating laboratories (ETL, IAE, NIST, NPL, PTB and VNIIM) has been set up and calls for completion of the comparison measurements by mid-1995. The transfer instruments, consisting of three Bonner spheres with diameters of 63,5 mm, 88,9 mm and 241,3 mm, will be returned to the BIPM for stability checks after each participating laboratory has completed its measurements. The BIPM will use a check-source arrangement specially designed and constructed for this purpose.

ii) *Neutron spectrometry*

The response functions and detection efficiencies of the BIPM NE-213 liquid scintillation detector have been calculated for 2,50 MeV and 14,65 MeV neutrons using the Monte Carlo codes supplied by the PTB. The results indicate that the calculated efficiencies are in good agreement with those obtained from the measurements carried out in 1991 using the coincidence method with associated particles (*see* Director's report 1991). Concerning the response functions, there is a fairly good agreement between the calculated and measured spectra for the 2,50 MeV neutrons; for the 14,65 MeV neutrons, some differences appear in the high-energy region of the spectra. This disagreement is due to saturation effects in the experimental pulse-height spectrum.

### iii) Neutron emission rate measurements

At the request of the LNMRI, an Am-Be neutron source from this institute will be calibrated at the BIPM using the manganese bath method. For this purpose, a new NaI(Tl) detector, and an entirely new electronic system using a PC-computer for data processing, have been investigated. Activity measurements of the manganese sulphate solution irradiated by our standard Ra-Be and Am-Be sources show that the whole system works satisfactorily. An increase of 4,7 % in the detection efficiency of the new system, relative to the old one, has been observed for both sources.

## 7.2 Radionuclides (J. W. Müller)

### 7.2.1 Activity measurements (G. Ratel)

#### i) International comparison of $^{75}\text{Se}$ activity measurements

All the results concerning the international comparison of measurements of  $^{75}\text{Se}$  activity concentration had reached the BIPM by the end of December 1992. A draft report summarizing the data supplied by the participants was prepared and served as a basis for the discussions during the June 1993 Section II meeting of the CCEMRI. Amendments to this document have been suggested and will be incorporated in the final report.

The comparison can be summarized as follows. Data from the twenty-one participating laboratories are shown in figure 7.1. Four different methods were employed to determine the activity of the solution prepared by the BIPM: the usual  $4\pi\beta\text{-}\gamma$  coincidence method was used by most

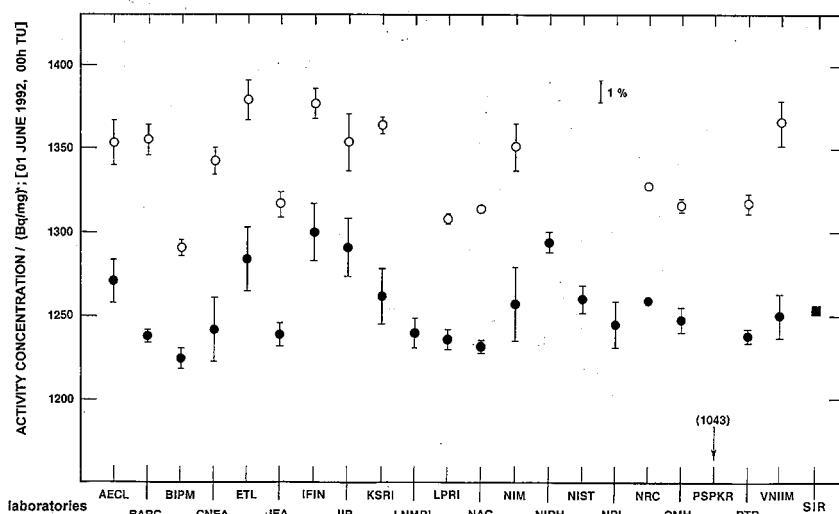


Fig. 7.1. — Results of the  $^{75}\text{Se}$  international comparison obtained before ○ and after ● correction for the delayed events. The value based on SIR measurements is also indicated.



laboratories (eighteen), and one also applied anti-coincidence counting. In addition,  $4\pi\gamma$  high-efficiency counting was used by two laboratories and two others used an ionization chamber.

To account for the events in the electron channel, a gas-flow proportional counter was used by most participants. The maximum efficiency depends strongly on the type of counter and can reach 0,75 for a pressurized proportional counter operated at 1,1 MPa. The two laboratories using liquid scintillation counting in the electron channel obtained efficiencies of 0,50 and 0,73.

Due to the presence of a metastable state at 304 keV in the decay of  $^{75}\text{Se}$ , the coincidence and anti-coincidence methods require a correction for the delayed events which are counted in the electron channel together with the prompt ones. Unfortunately, this correction is not well known and depends strongly on the way it is derived. Direct experimental measurements have led to values ranging from 5,4 % to 6,5 %, while computational methods, based on the use of nuclear data tables, provide corrections ranging from 4,9 % to 9,0 %, depending essentially on the setting of the gamma windows. Figure 7.2 shows the values used by the different laboratories.

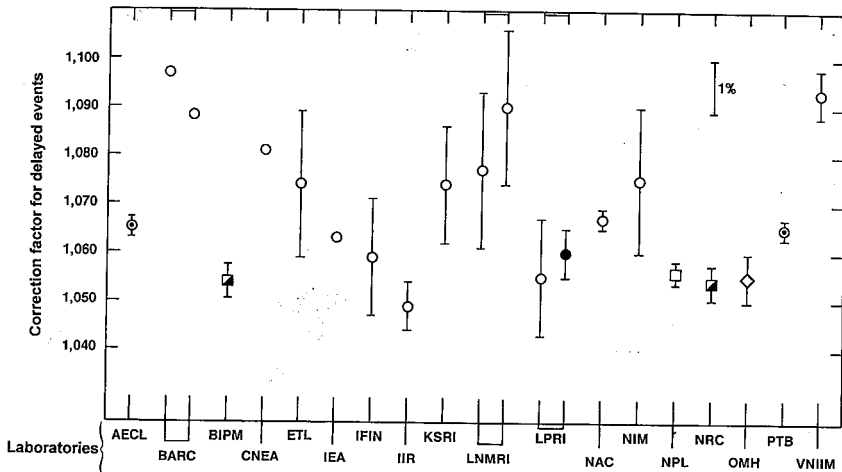


Fig. 7.2. — Correction factors for delayed events applied by the different laboratories. The symbols indicate the method of determination,  $\square$ ,  $\blacksquare$  NPL, correlation counting,  $\odot$  PTB, correlation counting,  $\bullet$  LPRI, double dead-time method,  $\diamond$  OMH, extrapolation method. The values  $\circ$  were evaluated on the basis of nuclear data tables.

The final results, shown in figure 7.1 (with the exception of that of PSPKR), have a total spread of 6 %. That this did not arise during preparation of the ampoules at the BIPM is confirmed by figure 7.3 which shows the ionization current, measured in the ionization chamber of the SIR for all delivered ampoules, beside the activity concentration obtained by the participating laboratories.

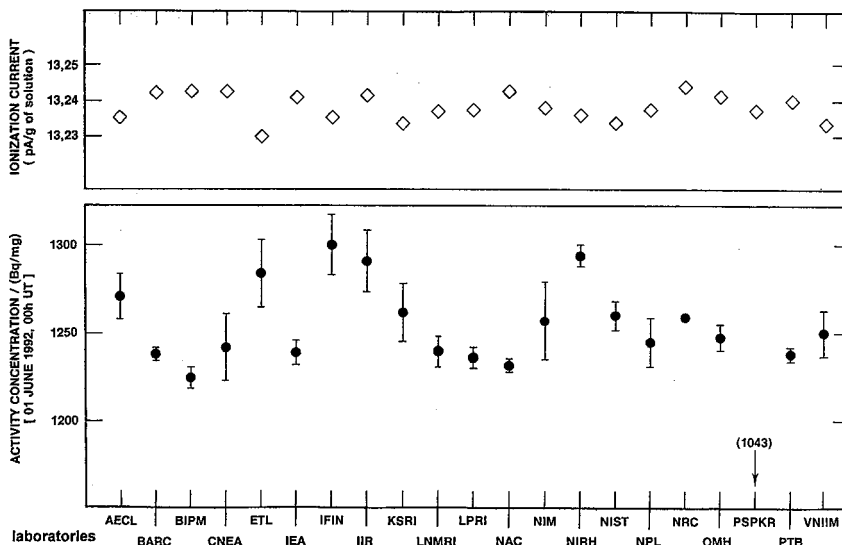


Fig. 7.3. — Comparison of the results of the activity concentration measured by the participating laboratories after correction for the delayed events, with the specific current corresponding to the ampoules of solution prepared at BIPM and obtained in the ionization chamber of the SIR.

The data seem to form two groups unrelated to the methods applied. The uncertainties assessed by some of the laboratories should be considered optimistic. The mean value of all measurements performed in the frame of the SIR system is also indicated in figure 7.1 and shows good agreement with the values of the lower group.

ii) *Investigation concerning the delayed transition in  $^{75}\text{Se}$*

Subsequent to the international comparison described above, a new approach for taking delayed events into account has been checked experimentally at the BIPM. It takes advantage of the fact that the delayed transitions appear in well-defined places in the electron spectrum. By carefully changing the position of the windows defining the pulse heights of the accepted events, it has been possible to separate these events from the others and thereby to determine their influence numerically [13].

iii) *International reference system for measuring the activity of gamma-ray emitting radionuclides (SIR)*

Since October 1992, eight laboratories (AECL, IRA, LPRI, NAC, OMH, PSPKR, PTB, VNIIM) have submitted sixteen ampoules, filled with eight radionuclidic solutions, namely  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{75}\text{Se}$ ,  $^{88}\text{Y}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ , giving thirteen new independent results. This leads to a total of 589 ampoules measured and 432 independent results entered in the SIR tables since this system was initiated.

### 7.2.2 Counting statistics (J. W. Müller)

Two topics have been selected to illustrate work recently performed; other work is described in reports and publications.

#### i) Statistics of a scaled-down Poisson process

When counting large numbers of pulses, the least significant digits can be omitted by registering only the events observed after a scaler with divisor  $d$ . We are interested in the statistical behaviour of the output number  $m$ , for a given Poisson input with mean value  $\mu = \rho t$ .

It is convenient to characterize the output  $m$  by its mean value  $\bar{m}$  and the variance  $s^2$  for a single measurement. The appropriate theoretical expressions were worked out long ago\*, but as most are quite complicated they have apparently never been used. We thought it worthwhile to check them experimentally.

Two cases should be distinguished. In one the pulses "left" in the divisor unit, i.e. the "rest" (of value between 0 and  $d - 1$ ), are maintained; in the other, the counter is reset to zero after each registration.

The expression for the measured variance of  $m$ , for example for the case of a reset to zero, can be brought into the form

$$s_0^2(\eta) = \frac{\mu}{d^2} + \frac{d^2 - 1}{12 d^2} + R_0(\eta), \quad \text{with } \eta = \mu/d,$$

where  $R_0(\eta)$  is given by one of Freycenon's formulae. Figure 7.4 shows that the comparison with our measurements is excellent. This is also true

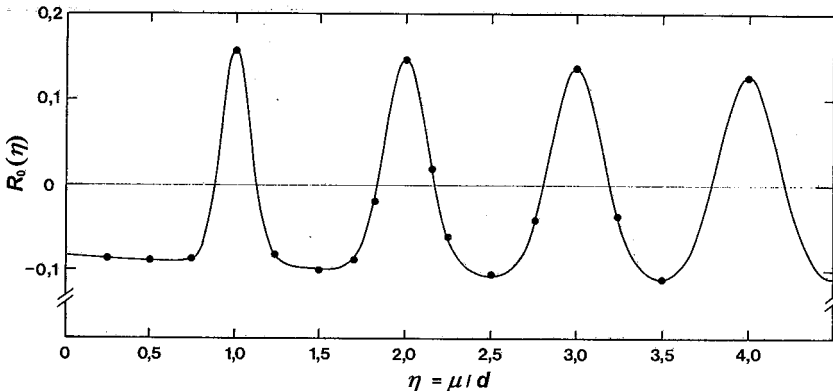


Fig. 7.4. — Comparison of the measurements with the theoretical shape for the oscillating part  $R_0(\eta)$  of the variance of  $m$  (for  $d = 100$  and zero reset).

\* J. FREYCENON, *Rapports CEA-R 2635* (1964), and *CEA-R 2907* (1966).

for the other experimental conditions chosen (i.e. with or without reset, for various divisors and count rates). Full agreement has also been observed between the theoretical and experimental mean values.

ii) *An on-line dead-time corrector*

We have been asked to judge a new correction device in which dead-time losses are automatically corrected for by replacing lost pulses with others inserted artificially, so that the registered output appears to be unaffected by the dead time. The study of a draft report on the basic principle involved proved difficult, as the available description is imprecise.

Suppose that the observed series of counts is known by its registered arrival times  $T_k$  (which may have been stored in a memory), where

$$T_k = k\tau + \sum_{j=1}^k \delta_j, \quad \text{for } k \geq 1,$$

for an inserted dead time  $\tau$  of the non-extendable type. If the dead time is eliminated, this leads to the sequence

$$t_k = T_k - k\tau = \sum_{j=1}^k \delta_j,$$

which can be shown to correspond to a Poisson process with the original count rate  $\rho$ . Obviously, all (unknown) losses occur during the dead times, but they can be simulated by the above reconstructed series. By forming, for each arrival time  $T_k$ , such a series from the preceding intervals, we can estimate how many losses  $K$  occurred during  $\tau$ . This number is given by the inequalities

$$\sum_{j=0}^K \delta_{k-j} < \tau \quad \text{and} \quad \sum_{j=0}^{K+1} \delta_{k-j} > \tau,$$

which can readily be solved numerically, for a given arrival time  $T_k$ .

This approach, also known as the Galushka method, when properly implemented electronically, may prove to be useful and convenient for many purposes, but there is no reason to prefer it to the more conventional approaches used in metrological applications since subsequent corrections may be strongly correlated.

## 7.3 Publications, lectures, travel: Ionizing Radiations section

### 7.3.1 External publications

1. BOUTILLON M., PERROCHE A.-M., Ionometric determination of absorbed dose to water for cobalt-60 gamma rays, *Phys. Med. Biol.*, 1993, **38**, 439-454.
2. BOUTILLON M., PERROCHE A.-M., Comparisons and calibrations at the Bureau International des Poids et Mesures in the field of X and  $\gamma$  rays, *International symposium on measurement assurance in dosimetry*, 1993, IAEA-SM-330/22.
3. BOUTILLON M., COURSEY B. M., HOHLFELD K., OWEN B., ROGERS D. W. O., Comparison of primary water absorbed dose standards, *International symposium on measurement assurance in dosimetry*, 1993, IAEA-SM-330/48.
4. SHORTT K. R., ROSS C. K., SCHNEIDER M., HOHLFELD K., ROOS M., PERROCHE A.-M., A comparison of absorbed dose standards for high energy x-rays, *Phys. Med. Biol.*, 1993, **38**, 1937-1955.

### 7.3.2 BIPM reports

5. BOUTILLON M., Experimental determination of  $C_A^K$  in a  $^{60}\text{Co}$  beam, *Document CCEMRI(I)/93-6*, April 1993, 5 pages.
6. HUYNH V. D., LAFAYE L., BIPM participation in an international comparison of neutron fluence measurements using two Bonner spheres as transfer instruments, *Rapport BIPM-92/6*, October 1992, 13 pages.
7. MÜLLER J. W., Alternate moments and parity moments, *Rapport BIPM-92/5*, October 1992, 6 pages.
8. MÜLLER J. W., Shifted developments of power functions, *Rapport BIPM-92/9*, November 1992, 12 pages.
9. MÜLLER J. W., Some remarks on the Galushka method, *Rapport BIPM-93/2*, February 1993, 7 pages.
10. MÜLLER J. W., Pooled variances, *BIPM Working Party Note 236*, April 1993, 5 pages.
11. PERROCHE A.-M., BOUTILLON M., KOVAR I., WAGNER R., Comparison of the air kerma standards of the UDZ and the BIPM for  $^{60}\text{Co}$  radiation, *Rapport BIPM-93/1*, January 1993, 6 pages.
12. PERROCHE A.-M., Comparisons and calibrations at the BIPM (1991-1993), *Document CCEMRI(I)/93-5*, April 1993, 9 pages.
13. RATEL G., Activity measurements of a  $^{75}\text{Se}$  solution in the frame of an international comparison (June 1992), Preliminary report, *Document CCEMRI(II)/93-14*, June 1993, 21 pages.

### 7.3.3 Travel (committees, visits to laboratories and institutions)

J. W. Müller visited:

— Vienna (Austria), 12-17 October 1992, to participate in the annual meeting of the ICRU Main Commission as the BIPM representative. On this occasion, he received the fifth award of the JARI Medal "in recognition of his major contribution to radioactivity measurements, his profound understanding of counting statistics and his creative approach to the treatment of uncertainties". The award was presented to him by Dr H. Seligman, Editor-in-Chief of the *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation, Part A, Applied Radiation and Isotopes*;

— Munich (Germany), 19-23 October 1992, to participate in the meeting of the ICRU Committee on Quantities and Units;

— the IAEA, Vienna (Austria), 23-27 November 1992, as a member of the SSDL Scientific Committee;

— the LGAI, Bellaterra (Spain), 9-11 December 1992, to participate in the workshop and seminar on measurement uncertainty in testing, evaluation and application. He gave a lecture entitled "A unified approach to the expression of uncertainty in measurements";

— the IMG, Turin (Italy), 9-12 March 1993, to participate in the Fourth EUROMET Mass meeting where he gave a lecture entitled "Presentation of the new Guide to the expression of uncertainty in measurement";

— the NPL, Teddington (UK), 7-11 June 1993, where he attended the International Symposium on Radionuclide Metrology;

— the IAEA, Vienna (Austria), 28 June-2 July 1993, as a consultant on the final draft of the IAEA Technical Report TRS-185;

— Tampere (Finland), 26-30 July 1993, to participate in the annual meeting of the ICRU Main Commission as the BIPM representative.

M. Boutillon took part in the annual meeting of the ICRU Main Commission held in Vienna (Austria), 12-17 October 1992.

M. Boutillon and A.-M. Perroche attended the International Symposium on Measurement Assurance in Dosimetry, in Vienna (Austria), from 24 to 27 May 1993. M. Boutillon gave a lecture entitled "Comparisons and calibrations at the Bureau International des Poids et Mesures in the field of  $x$  and  $\gamma$  rays".

G. Ratel attended the International Symposium on Radionuclide Metrology, NPL, Teddington, 7-11 June 1993, presented a poster entitled "Measurement of the activity concentration of a solution of  $^{75}\text{Se}$ " and gave an invited talk on the results of the international comparison of  $^{75}\text{Se}$ .

### 7.4 Activities related to external organizations

J. W. Müller is a member of the editorial board of *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. He is the BIPM representative at the

ICRU and Chairman of the ICRU Report Committee "Particle Counting in Radioactivity Measurements". He is also a member of the SSDL Scientific Committee advising the IAEA, a member of the Scientific Committee "Mesures Physiques et Métrologie" of the INM (Paris), and a member of the ISO Working Group of TAG 4 on the Expression of Uncertainties.

## **7.5 Visitors to the Ionizing Radiations section**

### **7.5.1 Guest workers**

Mme A.-M. Perroche (SCPRI, Le Vésinet, France) continues her participation in the work of the Ionizing Radiations section (Dosimetry) as she has done since 1961.

Messrs A. Kosunen and H. Lindroos (STUK, Helsinki, Finland) stayed at the BIPM from 23 to 27 November 1992 for the calibration of ionization chambers in the low- and medium-energy x-ray ranges and in the  $^{60}\text{Co}$  gamma radiation.

Mr E. R. Cecatti (LNMRI, Rio de Janeiro, Brazil) stayed at the BIPM from 28 June to 16 July 1993 for the calibration of ionization chambers from his laboratory.

### **7.5.2 Visitors**

Dr S. M. Seltzer (NIST, Gaithersburg, USA), 12 October 1992.

Dr H. Imai (ETL, Tsukuba, Japan), 29 October 1992.

Mr A. Etchehebere and Dr L. Contier de Freitas (LNMRI, Rio de Janeiro, Brazil), 2-4 November 1992.

Group of visitors from the ONERA (Châtillon, France), 26 November 1992.

Dr L. E. Grigorescu (IFIN, Bucharest, Romania), 9 February 1993.

Dr K. Sakihara (ETL, Tsukuba, Japan), 1 March 1993.

Messrs P. Blanchis and J.-L. Picolo (LPRI, Saclay, France), 2 March 1993.

Mr X. D. Phan (LNE, Paris, France), 28 April 1993.

Dr E. S. da Fonseca (LNMRI, Rio de Janeiro, Brazil), 22-23 March 1993.

Dr H. Klein (PTB, Braunschweig, Germany), 21 April 1993.

Dr K. Kudo (ETL, Tsukuba, Japan), 22 April 1993.

Mr D. F. G. Reher (IRMM, Geel, Belgium), 3 June 1993.

Dr Sun-Tae Hwang (KRIS, Taejeon, Korea), 4 June 1993.

#### IV. — PUBLICATIONS OF THE BIPM

##### 1. General publications

Since July 1992 the following have been published:

*Procès-Verbaux des Séances du Comité International des Poids et Mesures*, Tome **60**, 81st meeting, September 1992.

*Comité Consultatif d'Électricité*, 19th meeting, 1993.

*Annual Report of the BIPM time section* (1992), Vol. **5**, 1993, 150 pages.

*Circular T* (monthly), 4 pages.

##### 2. Metrologia (D. A. Blackburn)

Volume 29 of *Metrologia* was published in 1992 and early 1993. In Volume 29, 39 articles were published, 30 research papers and 9 reviews. For this volume the four research issues were supplemented by two special issues, one on electromagnetic measurement, the other taking the form of an index of measurements and theory relating to non-Newtonian gravity and new weak forces. In Volume 30 the supplements will both take the form of conference proceedings. One covers the meeting on *New Developments and Advances in Absolute Radiometry* held in Baltimore, USA, in October 1992 and the other the CCM Second International Seminar *Pressure Metrology from 1 kPa to 1 GPa*, held in Paris in June 1993.

In the year 1 January 1992 to 31 December 1992, 41 research papers were submitted for publication. Of these, 27 were published, 3 await publication, 10 were refused publication and 1 remains under consideration. From 1 January to 31 May 1993, 19 articles were submitted. At 31 May 1993, 2 of them had been published, 9 had been accepted for publication, 3 had been refused and 5 remain under consideration.

Production problems eased during 1992. The improved service we have had over the past year should allow *Metrologia* to return to its planned printing schedule during 1994.



## V. — MEETINGS AND LECTURES AT THE BIPM

### 1. Meetings

The Working Group on TAI met from 22 to 23 March 1993.

The CCDS met from 24 to 26 March 1993.

The CCM met from 9 to 11 June 1993.

The CCT met from 7 to 9 September 1993.

### 2. Lectures

The following lectures were given at the BIPM as part of the regular schedule of seminars:

G. Th. Guilbaud (EHESS, Paris): La mathématique de l'à-peu-près, 16 December 1992.

P. Connes (Service d'Aéronomie du CNRS, Verrières-le-Buisson): Accélérométrie astronomique absolue, 13 January 1993.

A. R. Colclough (NPL, UK): The work of the NPL Division of Mechanical and Optical Metrology, 21 January 1993.

P. Juncar (INM, Paris): Spectroscopie sans effet Doppler sur jet, 10 February 1993.

G. Petit: Pulsars et échelles de temps, 3 March 1993.

A. Maréchal (member of the Académie des Sciences, Paris): Le grand télescope européen (VLT), 27 April 1993.

D. Reymann: Comparaisons internationales de réseaux de jonctions de Josephson, 12 May 1993.

R. Köhler: La radiométrie au BIPM, 16 June 1993.

## VI. — CERTIFICATES AND NOTES OF STUDY

In the period from 1 October 1992 to 30 September 1993, 72 Certificates and 2 Notes of Study were delivered.

For a list of Certificates and Notes, *see* page 88.

## VII. — ACCOUNTS

Details of the accounts for 1992 may be found in the *Rapport annuel sur la situation administrative et financière du Bureau International des Poids et Mesures*. An abstract of Tables taken from this report may be found on pages 91-96.

The headings for the tables may be translated as follows:

<b>Compte I – Fonds ordinaires</b>	<b>Account I – Ordinary funds</b>
<b>Compte II – Caisse de retraites</b>	<b>Account II – Pension fund</b>
<b>Compte III – Fonds spécial pour l'amélioration du matériel scientifique</b>	<b>Account III – Special fund for the improvement of scientific equipment</b>
<b>Compte IV – Caisse de prêts sociaux</b>	<b>Account IV – Special loans fund</b>
<b>Compte V – Réserve pour les bâtiments</b>	<b>Account V – Building reserve</b> This account has had a balance of zero since 31 December 1989, with no changes registered since that date.
<b>Compte VI – Metrologia</b>	<b>Account VI – Metrologia</b>
<b>Compte VII – Réserve pour l'assurance maladie</b>	<b>Account VII – Reserve for medical insurance</b>

Two additional tables detail the payments made against budget in 1992 and the balance of accounts at 31 December 1992. This is done under the headings:

DÉTAIL DES DÉPENSES BUDGÉTAIRES

STATEMENT OF BUDGETARY EXPENDITURE

**Bilan au 31 décembre 1992**

**Balance at 31 December 1992**

It should be noted that in all tables the unit of currency is the gold franc (franc-or) which is defined by the equivalence 1 franc-or = 1,81452 French franc.

---

---

THE THIRD PERIODIC VERIFICATION  
OF  
NATIONAL PROTOTYPES OF THE KILOGRAM  
(1988-1992)

G. GIRARD

Bureau International des Poids et Mesures

---

*Introduction*

The Convention du Mètre, signed in Paris on 20 May 1875 by representatives of seventeen states, specifies in Article 6 :

" *Le Bureau international des poids et mesures est chargé:*

...

3° *Des comparaisons périodiques des étalons nationaux avec les prototypes internationaux et avec leurs témoins, ainsi que de celles des thermomètres étalons ;*

... "

The mass of the international prototype of the kilogram represents the unit of mass. Each periodic comparison is referred to as a *periodic verification*.

The first periodic verification took place from 1899 to 1911 without recourse to the international prototype. The second periodic verification, begun in 1939, was interrupted by the Second World War and started anew in 1946. It was finished in 1953 and the complete results were presented at the 10th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) in 1954 [1]. The third periodic verification of national prototypes of the kilogram was anticipated by Resolution 1 of the 18th CGPM in 1987. It began in the autumn of 1988 and was finished in the autumn of 1992.

The standards involved (*see* Table I) are : the international prototype and its six official copies K1, Nos. 7, 8(41), 32, 43 and 47, all of which are stored at the BIPM in a safe in the lower vault, and the BIPM prototypes No. 25 for special use and Nos. 9, 31 and 67 for routine use. Two official copies (Nos. 8(41) and 32) were selected as reference standards for the direct verification of the national prototypes.

All thirty-four countries possessing at least one platinum-iridium prototype responded positively to the BIPM request that their national prototype be sent to the BIPM on this occasion. Five new prototypes of recent manufacture (machined, finished and adjusted at the BIPM using a diamond tool) were added to the thirty-four described above. Of these five, three were assigned to member states (though none of these is necessarily the national prototype) : Israel (No. 71), the Republic of Korea (No. 72) and Canada (No. 74) ; one was purchased by the Government of Hong Kong (No. 75) and the last was kept by the BIPM (No. 77). Prototype No. 34 belonging to the Académie des Sciences of Paris was included in the third periodic verification because it is certain that it had not been used since 1961 : it had remained sealed in its travelling container.

TABLE I

International prototype			8			
Official copies	K1	7	8(41)*	32	43	47
BIPM prototypes						
for special use			25			
for routine use		9	31	67		
	G1		G2		G3	G4
National prototypes	12		21		5	2
	16		36		6	20
	23		37		18	46
	35		38		24	57
	39		40		50	
	48		44		55	
	49		53		56	
	51		54		58	
	68		60		66	
	70		65		69	
New prototypes						71
						72
						74
						75
						77
Other prototype						34

\* At the time it was made, official copy No. 8(41) was mistakenly marked with the identifier 41 instead of 8. The artefacts used in the third verification may be classed as : the international prototype, official copies, BIPM prototypes (working standards) for special or routine use, national prototypes, new prototypes, and one other prototype (No. 34). For the purposes of the verification, the national prototypes, new prototypes and the single other prototype were divided into four groups designated G1 to G4.

The course of the third periodic verification of national prototypes is shown in figure 1.

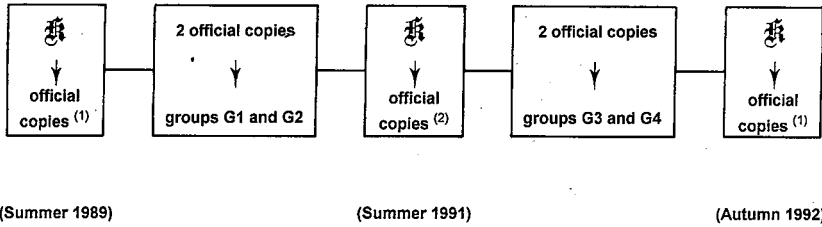


Fig. 1. — Course of the third periodic verification of national prototypes of the kilogram. The international prototype  $\mathfrak{K}$  was used on three occasions for direct comparisons with its six official copies and the four BIPM working standards <sup>(1)</sup> and three of the official copies and two of the BIPM working standards <sup>(2)</sup>. Two of the official copies were selected for direct comparisons with the national prototypes and were included with the groups G1 through G4.

The first and the last comparisons of the international prototype  $\mathfrak{K}$  with its six official copies and with the four working standards of the BIPM were carried out in the summer of 1989 and the autumn of 1992 respectively.

Prototypes Nos. 9 and 31 of the BIPM were neither cleaned nor washed throughout the entire period of the third verification (their last such treatment took place in 1978).

### Preliminary comparisons

In the autumn of 1988, the international prototype, its official copies and prototype No. 25 were compared with prototypes Nos. 9 and 31 before and after two successive cleaning and washings (*see* figure 2). One may note that the effect of these treatments on these standards was not insignificant, confirming measurements carried out on platinum-iridium standards brought to the BIPM since 1973 to be compared with our working standards. Figure 3 shows the change in mass ( $\Delta m$ ) caused by cleaning and washing of such standards as a function of the number of years since their previous cleaning and washing. The straight line with slope  $-1 \mu\text{g/a}$  is a good fit to the filled circles  $\bullet$  (the point representing prototype No. 57 has been excluded). The data for prototypes whose surface quality is poor are represented by the open circles  $\circ$ . They have not been included in calculation of the slope. The line does not pass through the origin, indicating that the variation of surface pollution with time may be more rapid just after washing and cleaning.

In 1985, the change in mass after cleaning and washing of prototype No. 18 was followed for 415 days, but the comparisons, with respect to two reference standards, only began after 26 days [2, (Fig. 9)]. The results of this study led us to undertake another which followed the change in mass of the international prototype starting just after it had been cleaned and washed, for it is this mass which is the ultimate reference. This study compared the international prototype, official copy No. 7 and two standards (Nos. 67 and 73) made by diamond machining with the two

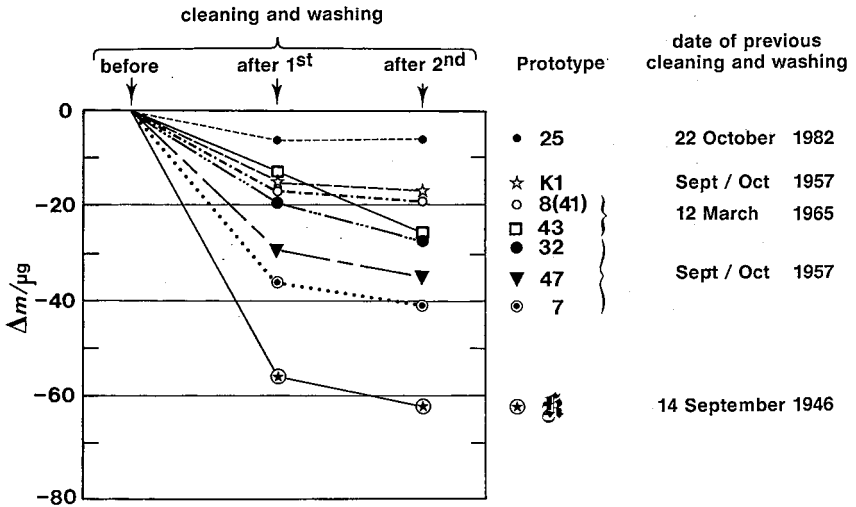


Fig. 2. — Change in mass  $\Delta m$  observed after each cleaning and washing of the international prototype  $\mathfrak{A}$ , its six official copies and prototype No. 25.

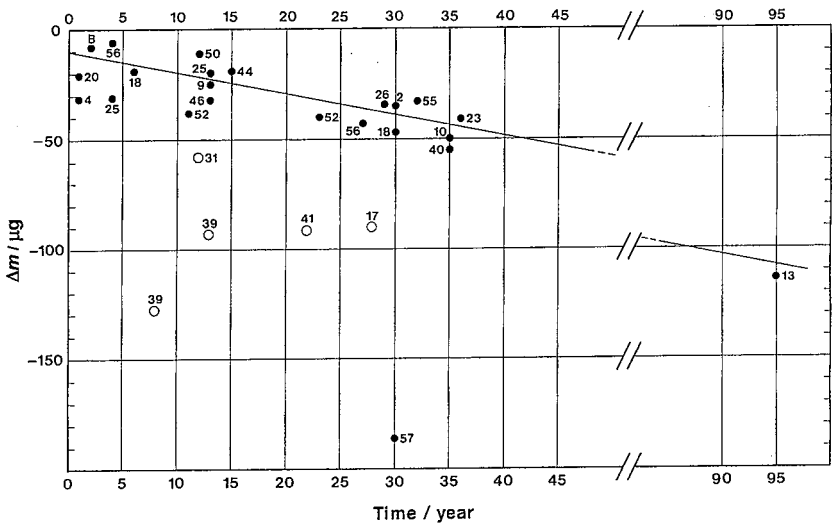


Fig. 3. — Change in mass  $\Delta m$  due to cleaning and washing of platinum-iridium prototypes as a function of the number of years since their previous cleaning and washing. The open circles  $\circ$  represent prototypes whose surface is of relatively poor quality.

reference standards Nos. 9 and 31. Figure 4 shows that during the first 120 days the change in the mass of the international prototype is linear with a slope of  $+0,0368 \mu\text{g/d}$ . This value was later applied to all the prototypes during the course of the third verification.

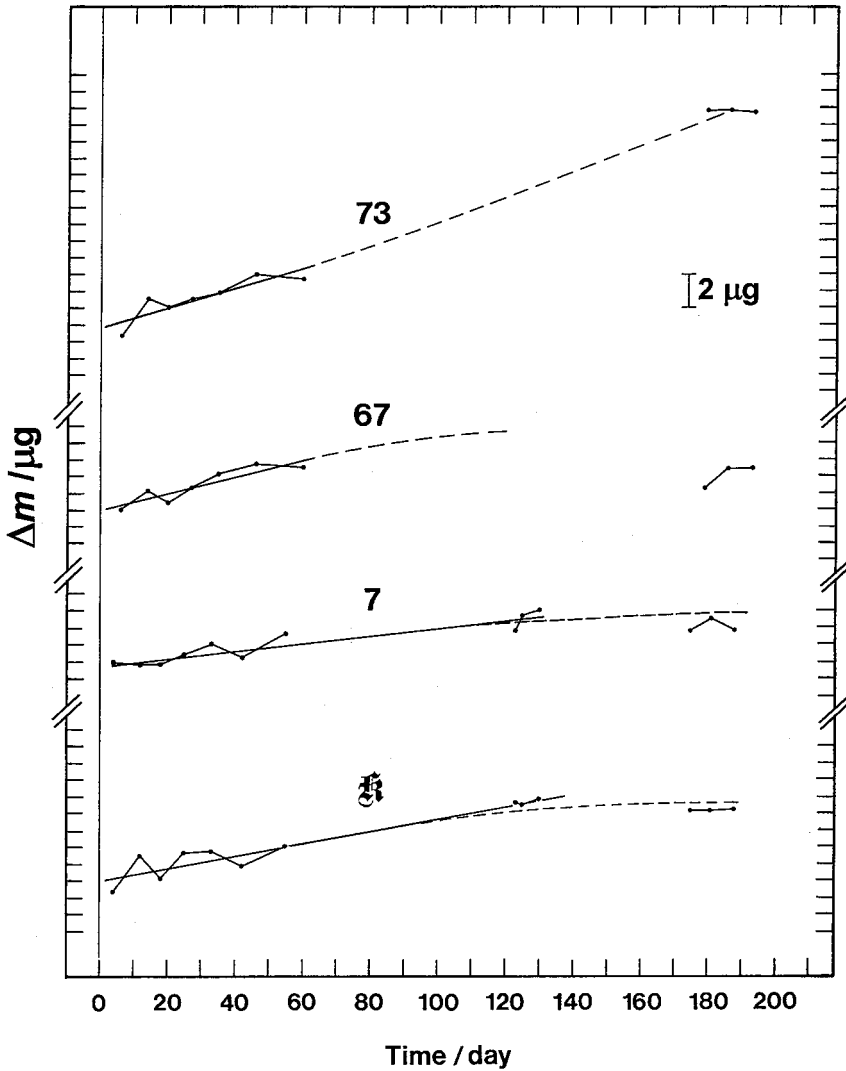


Fig. 4. — Increase in mass  $\Delta m$  during the first six months after cleaning and washing. Shown are the international prototype  $\text{IP}$ , an official copy (No. 7) and two prototypes made (polished and adjusted) by diamond turning.

### Comparisons with the international prototype

The comparison of the international prototype, its six official copies and the four working standards of the BIPM took place during the summer of 1989.

The NBS-2 balance was used for the weighings of the third verification (see Appendix 1). Its carousel can accommodate six standards and we thus

refer to a carousel with six weights as a full load or *balancée*. Comparison weighings were made with the following full loads :

- a)  $\mathfrak{K}$  and five prototypes, including No. 31 ;
- b)  $\mathfrak{K}$  and the other five prototypes, including No. 9 ;
- c) three prototypes from load a), including No. 31, and three from load b), including No. 9 ;
- d) the two remaining prototypes from a) with No. 31 and the two remaining prototypes from b) with No. 9.

Based on the value of the international prototype (always 1 kg exactly) one may deduce mass values for the others. Figure 5 represents the change in mass, with respect to that of the international prototype, of the four official copies (K1, Nos. 7, 8(41) and 32) and of prototype No. 25 between 1889 and 1989 and of the other official copies (Nos. 43 and 47) since 1946. Changes in prototypes Nos. 9 and 31 are not shown on this figure since they were neither cleaned nor washed.

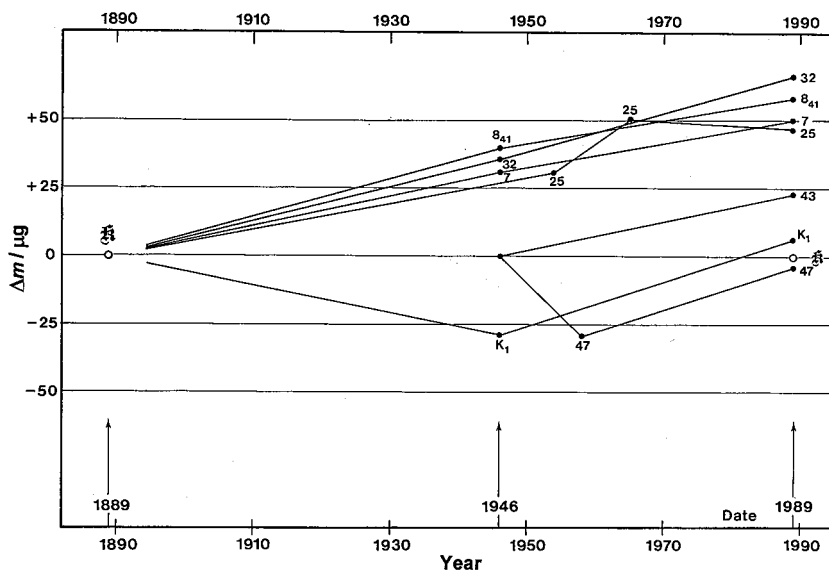


Fig. 5. — Change in mass  $\Delta m$  of the six official copies and of prototype No. 25 with respect to the mass of the international prototype  $\mathfrak{K}$ .

These results along with those of the preliminary comparisons led the CIPM, in September 1989, to take two decisions [3] :

1. to interpret the 1889 definition of the kilogram as referring to the mass of the international prototype just after cleaning and washing using the BIPM procedure [4] and to deduce this mass by extrapolation using the measured slope of  $+ 0,0368 \mu\text{g/d}$  ;
2. that the President of the CCM and the Director of the BIPM, after consulting the CCM Working Group on Mass Standards, should



decide whether national prototypes submitted for the third verification should be cleaned and washed.

In November 1989, the working group gave its opinion that the national prototypes should indeed be cleaned and washed, an opinion that was accepted.

### Verification of the national prototypes

The forty prototypes, national and others, were divided into four groups of ten according to their order of arrival at the BIPM. To each group (Table I, G1 to G4) were added the two official copies Nos. 8(41) and 32.

The following measurement algorithm was employed for the first group, G1 :

1. The prototypes of group G1 were compared in their state upon arrival at the BIPM (that is, before the two cleanings and washings) with two platinum-iridium standards of the BIPM.
2. Prototypes Nos. 9 and 31 were compared with the two official copies
  - a) before cleaning and washing of these official copies ;
  - b) after cleaning and washing of these two official copies and of the prototypes in G1, the cleanings and washings all taking place at approximately the same time.
3. The ten prototypes of G1 were compared with the two official copies using four full loads in the following way
  - a) No. 8(41) with five of the prototypes ;
  - b) No. 32 with the remaining five prototypes ;
  - c) No. 8(41) with two prototypes from load a) and three prototypes from load b) ;
  - d) No. 32 with the three remaining prototypes of load a) and the two remaining prototypes of load b).
4. Prototypes Nos. 9 and 31 were again compared with the two official copies.

This scheme of comparisons was repeated for group G3. For groups G2 and G4, step 2a) was omitted since it is identical with step 4 of the preceding group.

Between the measurements on groups G2 and G3 new comparisons were made with the international prototype, official copies Nos. 8(41), 32 and 7 and prototypes Nos. 9 and 31. Recall that official copy No. 7 had already been used in the study described on page G 37. The goal of these comparisons was to verify the stability of the two official copies Nos. 8(41) and 32.

After the measurements of group G4, a new comparison of the international prototype, its official copies and the working standards of

the BIPM was carried out. The third periodic verification of national prototypes of the kilogram was thus completed in the autumn of 1992.

## Results

All weighings were carried out on the NBS-2 balance except those preceding the cleaning and washing of groups G3 and G4, which were made on the Mettler HK 1000 MC balance.

Corrections for air buoyancy were calculated using the « Equation for the determination of the density of moist air (1981) » [5] - and not that of 1991 [6] - since the third periodic verification began in 1988. In any event, the changes to the equation adopted in 1991 would have no significant bearing on the results. Instruments used to measure temperature, pressure, humidity and CO<sub>2</sub> fraction were checked periodically. The uncertainty in the mass comparisons arising from the measurement of these parameters is negligible (*see* Appendix 2).

During the course of the comparisons it was possible to make preliminary estimates of the masses of the official copies and BIPM standards with respect to that of the international prototype. It appeared from this analysis that the mass of official copies Nos. 8(41) and 32 had diminished by a significant amount over the three years of the verification. As these provide the link between the international prototype and the national prototypes, the changes in Nos. 8(41) and 32 were examined in great detail.

A calculation taking into account all the observational data of the third verification was carried out with several different hypotheses. In the end, the most satisfactory of these added an adjustable parameter for each of the official copies, Nos. 8(41) and 32, which allowed its mass to vary linearly as a function of use. The other prototypes were assumed to be stable throughout the course of the measurements. Data received preliminary correction, using the linear coefficient given on page G 38, to eliminate mass increases between the dates of cleaning and washing and of comparison weighings made shortly thereafter.

All calculations, made with whatever hypothesis, show that the mass of BIPM prototype No. 67 was unstable in the period under consideration. It was, therefore, decided to eliminate the observations, taken in the summer of 1989 and the autumn of 1992, which involve this prototype.

After the third verification, several additional comparisons were carried out on a limited number of prototypes chosen from the each group. The new results are in satisfactory agreement with the values obtained from the third verification.

Table II shows the final results calculated for the prototypes included in the third periodic verification.

TABLE II

*Results of the third periodic verification  
of national prototypes of the kilogram  
(May 1989 - October 1992)*

International prototype		⌘	1 kg	
Official copies	K1	1 kg + 0,135 mg	No. 32	1 kg + 0,139 mg
	No. 7	1 kg - 0,481 mg	No. 43	1 kg + 0,330 mg
	No. 8(41)	1 kg + 0,321 mg	No. 47	1 kg + 0,403 mg
BIPM prototypes		No. 25	1 kg + 0,158 mg	
		No. 9	1 kg + 0,312 mg	
		No. 31	1 kg + 0,131 mg	
National and other prototypes	No. 2	Romania		1 kg - 1,127 mg
	No. 5	Italy		1 kg + 0,064 mg
	No. 6	Japan		1 kg + 0,176 mg
	No. 12	Russian Federation		1 kg + 0,100 mg
	No. 16	Hungary		1 kg + 0,012 mg
	No. 18	United Kingdom		1 kg + 0,053 mg
	No. 20	United States of America		1 kg - 0,021 mg
	No. 21	Mexico		1 kg + 0,068 mg
	No. 23	Finland		1 kg + 0,193 mg
	No. 24	Spain		1 kg - 0,146 mg
	No. 34	Académie des Sciences de Paris		1 kg - 0,051 mg
	No. 35	France		1 kg + 0,189 mg
	No. 36	Norway		1 kg + 0,206 mg
	No. 37	Belgium		1 kg + 0,258 mg
	No. 38	Switzerland		1 kg + 0,242 mg
	No. 39	Rep. of Korea		1 kg - 0,783 mg
	No. 40	Sweden		1 kg - 0,035 mg
	No. 44	Australia		1 kg + 0,287 mg
	No. 46	Indonesia		1 kg + 0,321 mg
	No. 48	Denmark		1 kg + 0,112 mg
	No. 49	Austria		1 kg - 0,271 mg
	No. 50	Canada		1 kg - 0,111 mg
	No. 51	Poland		1 kg + 0,227 mg
	No. 53	Netherlands		1 kg + 0,121 mg
	No. 54	Turkey		1 kg + 0,203 mg
	No. 55	Fed. Rep. of Germany		1 kg + 0,252 mg
	No. 56	South Africa		1 kg + 0,240 mg
	No. 57	India		1 kg - 0,036 mg
	No. 58	Egypt		1 kg - 0,120 mg
	No. 60	People's Rep. of China		1 kg + 0,295 mg
	No. 65	Slovak Rep.		1 kg + 0,208 mg
	No. 66	Brazil		1 kg + 0,135 mg
	No. 68	Dem. People's Rep. of Korea		1 kg + 0,365 mg
	No. 69	Portugal		1 kg + 0,207 mg
	No. 70	Fed. Rep. of Germany		1 kg - 0,236 mg
	No. 71	Israel		1 kg + 0,372 mg
	No. 72	Rep. of Korea		1 kg + 0,446 mg
	No. 74	Canada		1 kg + 0,446 mg
	No. 75	Hong Kong		1 kg + 0,132 mg
	No. 3	Spain		1 kg + 0,077 mg
	No. 62	Italy (IMGC)		1 kg - 0,907 mg
	No. 64	People's Rep. of China		1 kg + 0,251 mg

TABLE III  
*Evolution of the mass  
of platinum-iridium prototypes  
(mass in  $\mu\text{g}$  in excess of 1 kg)*

No.	Country	1889 (1)	1946/53 (2)	1989/92 (3)	(2)-(1)	(3)-(1)
⌘	International prototype	0	0	0	0	0
K1	Official copy	+ 127	+ 98	+ 135	- 29	+ 8
7	Official copy	- 530	- 499	- 481	+ 31	+ 49
8(41)	Official copy	+ 260	+ 300	+ 321	+ 40	+ 61
32	Official copy	+ 70	+ 107	+ 139	+ 37	+ 69
43	Official copy		+ 306	+ 330		
47	Official copy		+ 405	+ 403		
2	Romania	- 953	- 992	- 1127	- 39	- 174
5	Italy	+ 18	+ 18	+ 64	0	+ 46
6	Japan	+ 169	+ 170	+ 176	+ 1	+ 7
12	Russian Federation	+ 68	+ 85	+ 100	+ 17	+ 32
16	Hungary	+ 56	- 6	+ 12	- 62	- 44
18	United Kingdom	+ 70	+ 71	+ 53	+ 1	- 17
20	United States of America	- 39	- 19	- 21	+ 20	+ 18
21	Mexico	+ 63	+ 63	+ 68	0	+ 5
23	Finland	+ 61	+ 98	+ 193	+ 37	+ 132
24	Spain	- 191	- 173	- 146	+ 18	+ 45
34	Acad. sci. Paris	- 73	- 78	- 51	- 5	+ 22
35	France	+ 191	+ 183	+ 189	- 8	- 2
36	Norway	+ 157	+ 186	+ 206	+ 29	+ 49
37	Belgium	+ 244	+ 251	+ 258	+ 7	+ 14
38	Switzerland	+ 183	+ 214	+ 242	+ 31	+ 59
39	Rep. of Korea	- 118		- 783		- 665
40	Sweden	- 37	- 39	- 35	- 2	+ 2
44	Australia		+ 270	+ 287		
46	Indonesia		+ 294	+ 321		
48	Denmark		+ 81	+ 112		
49	Austria		- 325	- 271		
50	Canada		- 130	- 111		
51	Poland		+ 185	+ 227		
53	Netherlands		+ 85	+ 121		
54	Turkey		+ 160	+ 203		
55	Fed. Rep. of Germany		+ 208	+ 252		
3	Spain	+ 21	+ 44	+ 77	+ 23	+ 56

Table III shows the change in mass, with respect to that of the international prototype, of the official copies, the BIPM working standards and other prototypes. For official copies Nos. 8(41) and 32 and selected national prototypes, the changes observed since fabrication are shown in figures 6, 7 and 8. The original mass is considered to be, for prototypes Nos. 1 to 40, the value obtained in 1889. For the rest, it is the mass obtained the first time they were included in a periodic verification : for prototypes Nos. 41 to 55 this was the second periodic verification (1946-1953) ; for Nos. 56 to 72, 74, 75 and 77 it was the third.

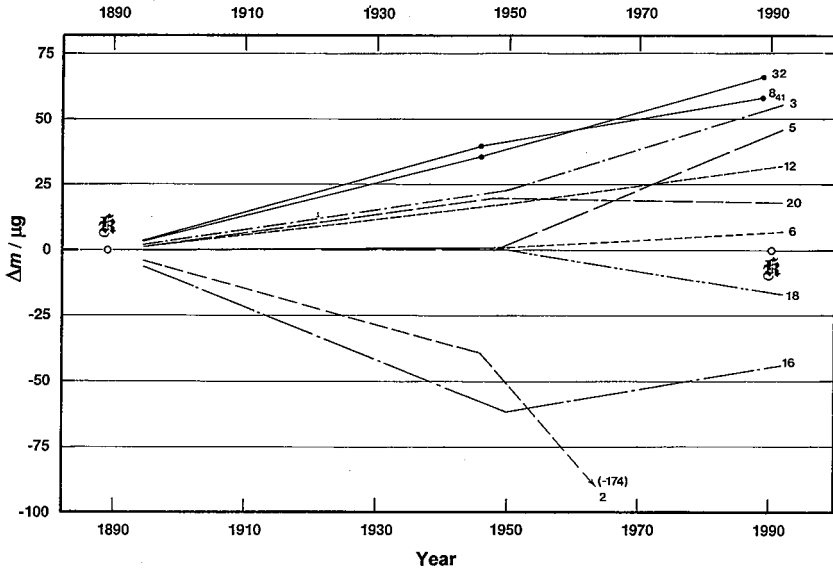


Fig. 6. — Change in mass  $\Delta m$  of national prototypes Nos. 2 to 20 and of official copies No. 8(41) and No. 32, with respect to the international prototype 0.

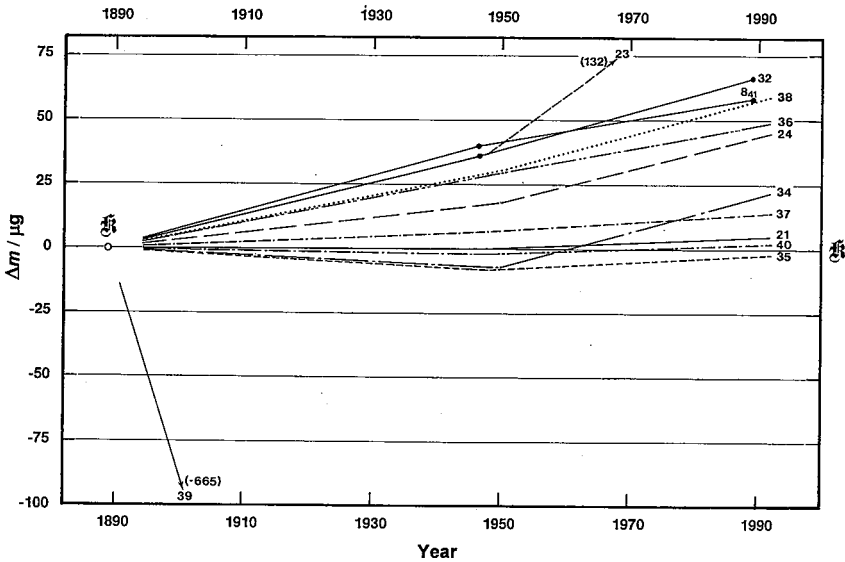


Fig. 7. — Change in mass  $\Delta m$  of national prototypes Nos. 21 to 40, and of official copies No. 8(41) and No. 32, with respect to the international prototype 0.

It is possible to assess the effect of cleaning and washing on the masses of the prototypes by comparing their masses before and after cleaning and washing. Figure 9 shows the effect of this treatment on each prototype as

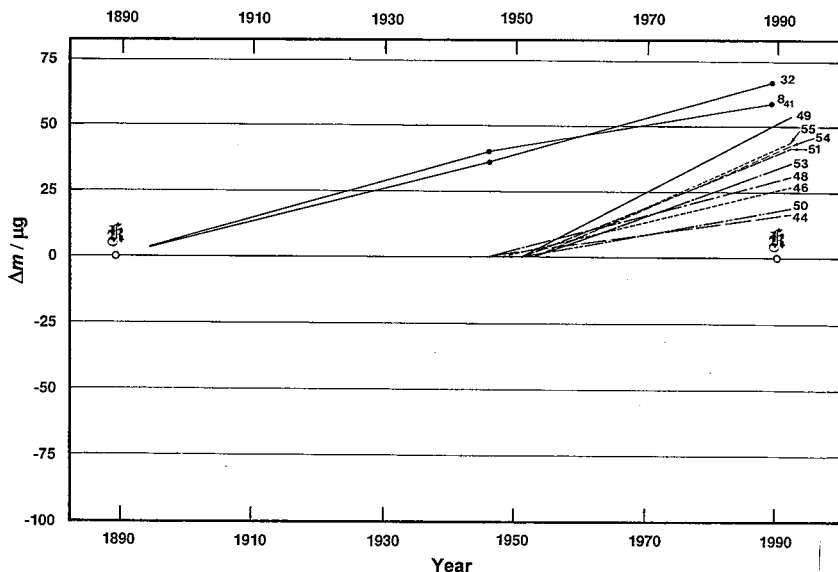


Fig. 8. — Change in mass  $\Delta m$  of national prototypes No. 44 to No. 55, and of official copies No. 8(41) and No. 32, with respect to the international prototype  $\text{X}$ .

a function of the number of years since the previous cleaning and washing. Note that the points representing the prototypes are much more dispersed than on figure 3, from which the slope of  $-1 \mu\text{g/a}$  is reproduced.

### Appended comparisons

The People's Republic of China and Spain each sent two prototypes to the BIPM. Only the national prototypes, Nos. 60 and 24 respectively, were included in the third periodic verification. The second prototypes, Nos. 64 and 3 respectively, were compared with our two working standards Nos. 9 and 31 and the two national prototypes at the end of the third verification. The data obtained were inserted into the global calculation. The masses of these prototypes are :

No. 64      1 kg + 0,251 mg ;

No. 3        1 kg + 0,077 mg.

The Istituto di Metrologia G. Colonnetti in Turin (Italy) had asked that its platinum-iridium prototype, No. 62, be calibrated by the BIPM at the time of the third verification. This was compared, among others, with the two working standards, Nos. 9 and 31, at the start of 1993. Its mass is :

No. 62      1 kg - 0,907 mg.

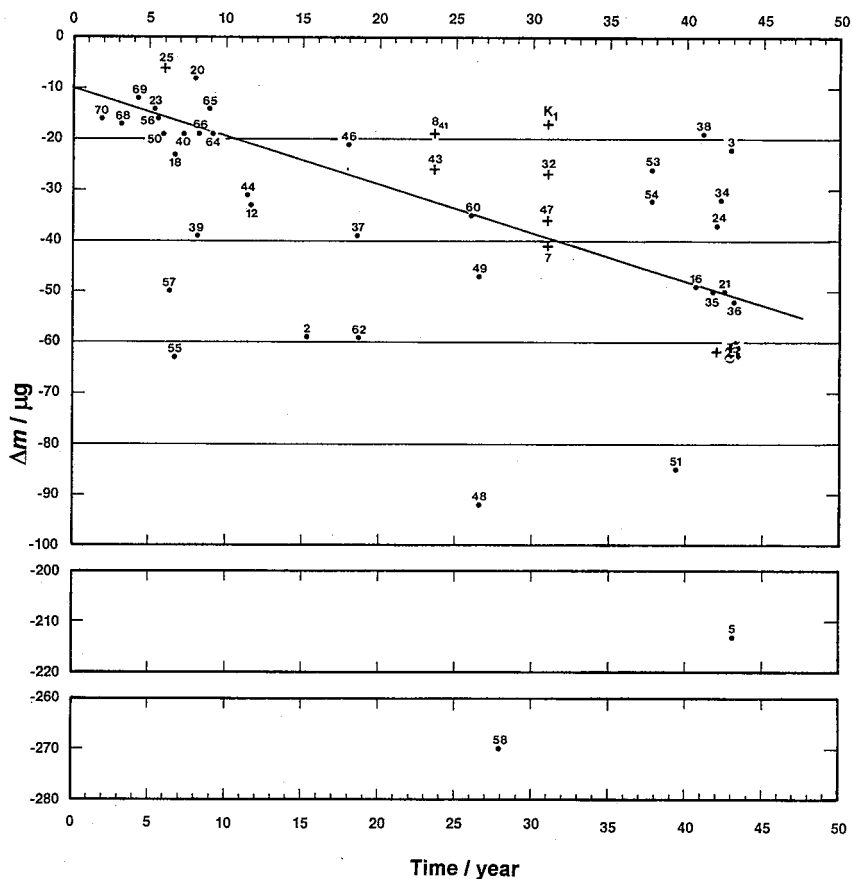


Fig. 9. — Change in mass  $\Delta m$  due to cleaning and washing of the prototypes that figured in the third verification. The change is plotted as a function of the number of years since the previous cleaning and washing. (• national prototypes ; + international prototype, its official copies and prototype No. 25).

### Calculation of uncertainty

The least-squares method can be used to calculate the mass of the prototypes within a group, either with respect to the international prototype or with respect to the two official copies. As a by-product, the calculation gives the standard deviation of a single observation as well as that of the mass calculated for each unknown standard.

For the seven such groups comprising the third verification, the standard deviation of a single observation ranges from 1,1  $\mu\text{g}$  to 1,5  $\mu\text{g}$ . The resulting standard deviation of the mass of a standard ranges from 0,4  $\mu\text{g}$  to 0,6  $\mu\text{g}$ . These uncertainties are type A since they are calculated by statistical inference.

In the same way, one obtains from the simultaneous least-squares fit to all the data a standard deviation of  $1,58 \mu\text{g}$  for a single observation. The standard deviation of the mass of each prototype ranges from  $0,35 \mu\text{g}$  to  $0,65 \mu\text{g}$ , depending on the number of times the prototype was used during the comparisons. One may note that  $1,58 \mu\text{g}$  is slightly greater than the standard deviation of an observation calculated for a single group. This is due to the fact that our hypothesis, that the masses of copies Nos. 8(41) and 32 vary as linear functions of their use is, perhaps, not exact.

To estimate the additional uncertainty introduced by the hypothesis, two methods were used :

— On the one hand, the global calculation allows us to predict the average of the masses of the two official copies each time they are used. The calculation is based on values measured just after their initial cleaning and washing and the fitted coefficient that takes account of their change with use. The predicted values are the open circles of figure 10.

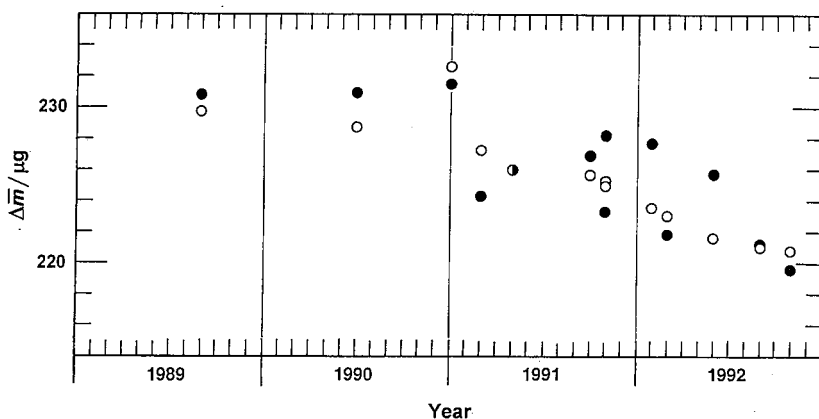


Fig. 10. — Variation of the excess,  $\Delta\bar{m}$ , with respect to the nominal value of the average mass of official copies Nos. 8(41) and 32. The dots ● represent values found from limited data sets. The open circles ○ represent values obtained from a global calculation.

— On the other hand, relying on the three groups containing the international prototype and on the comparisons of the two official copies with BIPM working standards Nos. 9 and 31, one may estimate the average of the masses of the two official copies at the times they were used with the groups G1 through G4. These are the filled circles of figure 10.

The two methods of calculation lead to slightly different mass values for the two official copies. The standard deviation of the thirteen differences ( $2,3 \mu\text{g}$ ) gives a value for the additional uncertainty, again of type A. This additional component propagates directly to the prototypes of groups G1 to G4 since their link to the international prototype is through the average of the masses of the two official copies. The combined uncertainty  $u_c$  (with



$k = 1$ ) for the mass of each prototype in groups G1 through G4 is thus calculated to be  $2,3 \mu\text{g}$  based on 12 degrees of freedom. The combined uncertainty is, in essence, dominated by the uncertainty in the average mass of the official copies.

## Conclusions

It is possible to draw several conclusions from the comparisons made during the course of the third verification.

The changes in mass of prototypes whose fabrication dates from 1886 (Nos. 1 to 40), whose mass values were sanctioned by the first CGPM in 1889 and which were included in the third periodic verification confirm the trend observed at the time of the second periodic verification (1946-1953). Note that the mass referred to here is that just after cleaning and washing and the observed increase is not, therefore, that discussed earlier (*see* Fig. 3), which is considered to be due to contamination and is removed by cleaning and washing. There are, to be sure, several standards that have been accidentally damaged and so cannot be taken into account (Nos. 2, 16, 39). Also of note is the peculiar behaviour of prototype No. 23 since 1948.

The mass of apparently well-stored, carefully-used national prototypes in the first batch has, on average, grown by  $0,25 \mu\text{g/a}$ .

The masses of prototypes Nos. 44 to 55 which participated in the third verification show a greater rate of change, about  $0,9 \mu\text{g/a}$ , since the second periodic verification.

The rates of change must be interpreted with care. They are influenced, in aggregate with respect to the international prototype, by loss of mass from wear during use, increase in mass from irreversible surface contamination and, possibly, additional processes that are not yet understood.

The case of prototype No. 34 belonging to the Académie des Sciences de Paris (not to be confused with the national prototype of France) is of particular interest. It was calibrated at its time of fabrication, in 1950 and during the third verification. It was used in 1961 at the BIPM for some special comparisons but after that remained sealed in its travel case. Its successive values are :

1889	1 kg - 0,073 mg ;
1950	1 kg - 0,078 mg ;
1992	1 kg - 0,051 mg.

The increase in its mass relative to that of the international prototype, + 0,027 mg between 1950 and 1992, may thus be considered both significant and certain.

Figure 9, which may be compared with figure 3, shows the variations in mass caused by cleaning and washing of the prototypes that participated in the third periodic verification. This change is a function of the number of years since the previous cleaning and washing, generally at the BIPM. The dispersion of the points is partly due to the quality of conservation of the standard but probably also to the state of its surface and the use to which it has been put. Even so, one may note the large dispersion among measured values for the international prototype and its official copies, all of which have been maintained in the same way.

The interpretation of figure 9 must be made with some care since certain prototypes have been submitted to cleaning processes other than that used at the BIPM and their effects may be different (which would imply a vertical displacement of the corresponding representative point on the figure). This is the case, among others, for prototype No. 6 which could not be included in figure 9 and of prototypes Nos. 4 and 20 (*see* figure 3) which had undergone cleaning and washing in their laboratories one year before.

The third verification of national prototypes of the kilogram was an occasion which brought together the national standard of all member states of the Convention du Mètre possessing a platinum-iridium prototype. During the verification each mass was determined, with respect to the mass of the international prototype with a combined uncertainty of 2,3  $\mu\text{g}$ . This constitutes a good foundation for future work in the mass field.

### Acknowledgements

I am grateful to several people without whose help I would not have been able to see this important task to fruition. They include P. Carré (computers), J. Hamon (interferometry), J.-M. Chartier (lasers), J. Hostache (electronics) and the staff of the workshop. I would like to mention in particular Mrs M.-J. Coarasa who carried out the weighings before the cleaning and washing of groups G3 and G4 and who, during the third periodic verification but also for many years before, provided very valuable help and sensible advice. I also thank Mr T. J. Quinn, director of the BIPM, for his advice and support, as well as R. S. Davis, now Head of the Mass section of the BIPM. I should be remiss were I not to thank as well those at NIST (USA) who, in the 1960s, built and perfected the NBS-2 balance. Its operation has never been called into question and it has permitted the achievement of weighings of very high quality.

September 1993

## APPENDIX 1

---

### The NBS-2 balance

---

The NBS-2 balance was developed at the National Bureau of Standards (today the National Institute of Standards and Technology) in the United States of America and is described in [7]. In 1970, it was given to the BIPM. It was permanently installed in the basement of the former balance room at the BIPM where the first official weighings were carried out in 1973. The balance is of single-pan design and has two knives. A 1 kg standard placed on the pan is balanced against a counterweight of platinum-iridium (if necessary, counterweights in stainless steel may be used). The length of each arm of the beam is 5,08 cm. The period of oscillation is about 37 s. The knives and flats stay in contact, under full load, throughout the weighings. A carousel on which six 1 kg standards may be placed is used to place the desired standard on the balance pan. It is therefore possible to compare up to six standards in all pairwise combinations. In practice, all the weighings were carried out by comparisons of all pairwise combinations of four standards.

Several improvements were made to the balance over the years :

- 1) installation of an aluminium belljar over the balance in order to create an airtight enclosure [8] ;
- 2) improvement of the thermal insulation so as to allow a natural temperature difference between the levels of the pan and the beam of about 0,01 °C [8] ;
- 3) installation of two counterweights to decrease friction when the carousel is moved vertically ;
- 4) installation of better vacuum feedthroughs.

More recently, an angle interferometer with fringe counter and computer link [9] was added to complement the original optical system for reading the beam oscillations. Data from the fringe counter are acquired by a special program, written several years ago, which calculates, with respect to a reference standard, the masses involved in the weighing.

In using the balance, particularly during the third periodic verification, six standards, here designated A, B, C, D, E and F, are placed on the carousel. This constitutes a full load or *balancée*. A weighing or *pesée* involves four of the standards, for example A, B, C and D. The six standards of a full load are compared in three weighings :

1st weighing : standards A, B, C, D ;

2nd weighing : standards C, D, E, F ;

3rd weighing : standards E, F, A, B.

Around 1982, a special study made it clear that in the weighings the value obtained for the mass of an unknown with respect to the reference standard may vary significantly depending on the order in which the standards are compared. A more searching study was undertaken which led us to modify our procedure [10].

A weighing involving four standards used to comprise only six subweighings (*sous-pesées*). To these “*direct*” subweighings we now add six “*opposed*” (*opposée*) subweighings. For four standards A, B, C, D this takes the form :

direct weighing : A versus B, B versus C, C versus D,  
D versus A, A versus C, B versus D ;  
opposed weighing : B versus A, C versus B, D versus C,  
A versus D, C versus A, D versus B.

The direct and opposed weighings are carried out under conditions that are as similar as possible, for example at the same time on two consecutive days.

To calculate the results of a weighing, we use the method of least squares applied to the means of corresponding subweighings from the direct and opposed weighings.

The comparison or *observation* of two standards (A and B for example) is carried out by comparing each with the counterweight. The equilibrium positions of the beam, which are read in terms of an arbitrary scale (either the ruled optical scale used in 1970 or the output of the fringe counter used now), correspond to the following loads :

- a) standard A ;
- b) standard B ;
- c) standard B + sensitivity weight S ;
- d) standard A + sensitivity weight S ;
- e) standard A.

Standards A and B are exchanged in the corresponding opposed subweighing.

The sensitivity weight is a small, calibrated rider of 3 mg which serves to determine the value in mass for one division of whichever scale is used.

Figure 1 shows an example of a complete weighing (direct and opposed) between four prototypes. A least squares adjustment of the mass of the three unknown prototypes in terms of the reference mass is also given. The unadjusted observations of these four prototypes may then be associated with additional observations for the same group.

PESÉE À LA BALANCE NBS-2							
Registre :	5 Mars 1991			(8 h 20-10 h 54)			
R10-51							
Kilogrammes	[8(41)]	[21]	[36]	[37]			
Thermomètre : RE2	Résistance étalon : 225350						
Pont : F17A	Temp. R. étalon : 20,5 °C		Corr. j. pression : 781 Pa				
Sous-pesées	A	B	B + S	A + S	A	A - B	
1	7 468	8 842	27 362	25 899	7 501	- 1 418,1	
2	8 193	7 339	25 798	26 601	8 265	828,2	
3	8 407	8 105	26 533	26 793	8 473	280,7	
4	8 674	8 298	26 728	27 066	8 768	357,2	
5	8 091	8 598	27 029	26 435	8 165	- 550,5	
6	8 300	7 190	25 532	26 626	8 411	1 102,3	
Lect. ASL	Temp. °C	Lect. Press	Pression Pa	Hygr.	CO <sub>2</sub>	M. vol. air	
1	2,754 831 0	20,378	100 505,0	101 286,0	0,490	0,000 65	1,197 36
2	2,754 835 0	20,378	100 505,0	101 286,0	0,490	0,000 65	1,197 36
3	2,754 841 0	20,379	100 505,0	101 286,0	0,490	0,000 65	1,197 35
4	2,754 848 0	20,380	100 505,0	101 286,0	0,490	0,000 65	1,197 35
5	2,754 857 0	20,381	100 505,0	101 286,0	0,490	0,000 65	1,197 35
6	2,754 867 0	20,382	100 505,0	101 286,0	0,490	0,000 65	1,197 34
6	2,754 877 0	20,382	100 505,0	101 286,0	0,490	0,000 65	1,197 34
Masse de la surcharge : 3,026 6 mg							
Comparaison	Val. div. (microg)	Diff. (mg)	Obs.-Calc. (mg)	Dérives en mg			
				chgt. masse	déplt.	surch.	
[21]-[8(41)]	0,163 962	- 0,253 25	0,000 85	- 0,007 33		0,010 04	
[36]-[21]	0,164 512	0,139 49	- 0,001 38	- 0,004 19		0,010 09	
[37]-[36]	0,164 722	0,056 78	0,003 57	- 0,003 50		0,008 95	
[8(41)]-[37]	0,164 811	0,065 81	0,005 80	- 0,003 25		0,010 94	
[36]-[8(41)]	0,164 932	- 0,108 28	0,004 95	- 0,007 23		0,013 29	
[37]-[21]	0,165 586	0,196 30	0,002 23	- 0,001 36		0,010 51	
Contrainte n° 1	[8(41)] = 0,300 0 mg (valeur du fichier)						
	→					Differences : "direct" weighing	
RÉSULTAT DE LA PESÉE							
Masses	Val. nom. (mg)	Excès (mg)	Écart-type (mg)				
[8(41)]	1 000 000	0,300 00	0,000 00				
[21]	1 000 000	0,045 91	0,003 61				
[36]	1 000 000	0,186 77	0,003 61				
[37]	1 000 000	0,239 98	0,003 61				
Écart-type de la sous-pesée : 0,005 11 mg							
Cette pesée est stockée sous le nom PES/91-63 sur le disque BNBSO4 et traitée avec le fichier R10-50 enregistré PRE/91-59.							

Fig. 1 (a). — Example of computer output for a single "direct" weighing. The first block of data specifies the prototypes and equipment used, the second the balance readings in scale divisions, and the third environmental readings for each weighing. This is followed by the observed mass differences and the results of the weighings.

PESÉE À LA BALANCE NBS-2							
Registre : R10-52		6 Mars 1991			(9 h 09-12 h 28)		
Kilogrammes	[8(41)]	[21]	[36]	[37]			
Thermomètre : RE2	Résistance étalon : 225350						
Pont : F17A	Temp. R. étalon : 20,5 °C			Corr. j. pression : 781 Pa			
Sous-pesées	B	A	A + S	B + S	B	B - A	
1	8 827	7 406	25 989	27 358	8 827	1 394,7	
2	7 147	7 896	26 281	25 440	7 236	- 795,1	
3	8 089	8 277	26 796	26 538	8 169	- 222,8	
4	8 305	8 574	27 046	26 722	8 382	- 296,2	
5	8 593	7 976	26 359	26 971	8 650	614,1	
6	7 137	8 129	26 594	25 492	7 245	- 1 047,0	
Lect. ASL	Temp. °C	Lect. Press	Pression Pa	Hygr.	CO <sub>2</sub>	M. vol. air	
1	2,754 857 0	20,381	100 497,0	101 278,0	0,490	0,000 65	1,197 25
	2,754 861 0		100 497,0				
2	2,754 914 0	20,387	100 497,0	101 277,5	0,490	0,000 65	1,197 22
	2,754 925 0		100 496,0				
3	2,754 872 0	20,382	100 496,0	101 277,0	0,490	0,000 65	1,197 23
4	2,754 881 0	20,383	100 496,0	101 277,0	0,490	0,000 65	1,197 23
5	2,754 891 0	20,384	100 496,0	101 277,5	0,490	0,000 65	1,197 23
6	2,754 902 0	20,385	100 497,0	101 278,0	0,490	0,000 65	1,197 23
	2,754 914 0		100 497,0				
Masse de la surcharge : 3,026 6 mg							
Comparaison	Val. div. (microg)	Diff. (mg)	Obs.-Calc. (mg)	Dérives en mg chgt. masse déplt. surch.			
[8(41)]-[21]	0,163 097	0,248 20	0,000 20	- 0,004 20	0,004 21		
[21]-[36]	0,165 434	- 0,134 77	- 0,000 20	- 0,007 66	0,015 00		
[36]-[37]	0,164 094	- 0,047 10	0,005 14	- 0,005 80	0,012 31		
[37]-[8(41)]	0,164 433	- 0,055 66	0,005 54	- 0,004 57	0,010 85		
[8(41)]-[36]	0,164 918	0,118 77	0,005 34	- 0,000 48	0,005 15		
[21]-[37]	0,164 886	- 0,186 41	0,000 40	- 0,009 10	0,018 03		
Contrainte n° 1	[8(41)] = 0,300 0 mg (valeur du fichier)						
	Differences : "opposed" weighing						
<b>RÉSULTAT DE LA PESÉE</b>							
Masses	Val. nom. (mg)	Excès (mg)	Écart-type (mg)				
[8(41)]	1 000 000	0,300 00	0,000 00				
[21]	1 000 000	0,052 00	0,003 78				
[36]	1 000 000	0,186 57	0,003 78				
[37]	1 000 000	0,238 81	0,003 78				
Écart-type de la sous-pesée : 0,005 35 mg							
Cette pesée est stockée sous le nom PES/91-65 sur le disque BNBSO4 et traitée avec le fichier R10-50 enregistré PRE/91-59.							

Fig. 1 (b). — The "opposed" weighing corresponding to the "direct" weighing of Fig. 1 (a) above.

5/6 mars 1991

Comparaison des prototypes nationaux (Groupe 2)

Liste des étalons : 8(41) 21 36 37

Contrainte

8(41) = 0,321 54

Observations		Val. observ.	Val. calc.	Écarts
8(41)-21	=	0,250 73	0,251 05	- 0,000 32
21-36	=	- 0,137 13	- 0,137 72	0,000 59
36-37	=	- 0,051 94	- 0,052 72	0,000 78
37-8(41)	=	- 0,060 74	- 0,060 61	- 0,000 13
8(41)-36	=	0,113 53	0,113 33	0,000 20
21-37	=	- 0,191 36	- 0,190 44	- 0,000 91

Écart-type d'une observation 0,000 81

Masses des étalons et écarts-types

8(41)	:	0,321 54	0,000 00
21	:	0,070 49	0,000 57
36	:	0,208 21	0,000 57
37	:	0,260 93	0,000 57

averages : "direct" and  
"opposed"  
weighing

Équations normales

3	- 1	- 1	- 1	1	0,424 99
- 1	3	- 1	- 1	0	- 0,579 21
- 1	- 1	3	- 1	0	- 0,028 34
- 1	- 1	- 1	3	0	0,182 56
1	0	0	0	0	0,321 54

Variance et covariances réduites (multipliées par 1 000)

0	0	0	0
0	500	250	250
0	250	500	250
0	250	250	500

Observations et contraintes enregistrées dans le fichier R10-51/52 du disque FIMAO2.

Fig. 1 (c). — Calculated mass differences as a least squares fit to the averages of each subweighing of Fig. 1 (a) and 1 (b) above, constrained by a provisional value for prototype No. 8(41). These are followed by the mass values in milligrams in excess of 1 kg and the associated uncertainties of the prototypes that were compared.

5 mars/25 avril 1991

Comparaison des prototypes nationaux (Groupe 2)

Liste des étalons : 8(41) 21 36 37 38 40 44 53 54 32 60 65

Contrainte			averages for weighings of 5/6 March 1991	
Observations	=	Val. observ.	Val. calc.	Écart
8(41)	=	0,321 54		
8(41)-21	=	0,250 73	0,250 50	0,000 23
21-36	=	- 0,137 13	- 0,138 19	0,001 06
36-37	=	- 0,051 94	- 0,051 80	- 0,000 14
37-8(41)	=	- 0,060 74	- 0,060 50	- 0,000 23
8(41)-36	=	0,113 53	0,112 31	0,001 22
21-37	=	- 0,191 36	- 0,189 99	- 0,001 36
36-37	=	- 0,051 62	- 0,051 80	0,000 19
37-38	=	0,017 14	0,016 34	0,000 80
38-40	=	0,277 46	0,276 22	0,001 23
40-36	=	- 0,241 06	- 0,240 76	- 0,000 30
36-38	=	- 0,035 08	- 0,035 46	0,000 38
37-40	=	0,291 96	0,292 56	- 0,000 60
38-40	=	0,277 27	0,276 22	0,001 05
40-8(41)	=	- 0,353 08	- 0,353 06	- 0,000 01
8(41)-21	=	0,252 03	0,250 50	0,001 53
21-38	=	- 0,175 18	- 0,173 65	- 0,001 52
38-8(41)	=	- 0,075 46	- 0,076 84	- 0,001 38
40-21	=	- 0,103 60	- 0,102 57	- 0,001 03
44-53	=	0,165 65	0,165 60	0,000 05
53-54	=	- 0,080 50	- 0,081 67	0,001 17
54-32	=	0,066 87	0,067 33	- 0,000 46
32-44	=	- 0,151 89	- 0,151 26	- 0,000 62
44-54	=	0,084 07	0,083 93	0,000 14
53-32	=	- 0,013 79	- 0,014 34	0,000 55
54-32	=	0,066 95	0,067 33	- 0,000 38
32-60	=	- 0,158 96	- 0,159 72	0,000 76
60-65	=	0,087 09	0,087 14	- 0,000 06
65-54	=	0,006 32	0,005 25	0,001 07
54-60	=	- 0,095 05	- 0,092 39	- 0,002 66
32-65	=	- 0,074 00	- 0,072 58	- 0,001 42
60-65	=	0,086 58	0,087 14	- 0,000 56
65-44	=	- 0,077 86	- 0,078 69	0,000 83
44-53	=	0,166 33	0,165 60	0,000 73
53-60	=	- 0,173 64	- 0,174 06	0,000 42
60-44	=	0,010 07	0,008 46	0,001 61
65-53	=	0,087 72	0,086 91	0,000 81
...				

Fig. 1 (d). — Truncated series of results for G2 beginning with the values in Fig. 1 (c) above.



## APPENDIX 2

---

### Correction for air buoyancy

---

Throughout the comparisons of the third verification, it was necessary to apply an air buoyancy correction. This is calculated from the volume of the standards and the density of the air. The latter is determined by means of the "Equation for the determination of the density of moist air (1981)" [5] based on measurements of temperature, atmospheric pressure, relative humidity and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) level.

The temperature sensor is a Rosemount capsule-type platinum resistance thermometer (PRT) with a nominal resistance of 25 Ω. The precise resistance was measured using a bridge manufactured by Automated Systems Laboratories (ASL, model F17A). The least significant digit of the bridge output represents 0,1 mK. In 1991, the resistance of the PRT was compared at ambient temperature with that of a Tinsley standard platinum resistance thermometer (SPRT) which confirmed that the stability of the PRT is excellent.

Atmospheric pressure within the balance enclosure is measured using a Garrett gauge operating in the absolute mode. This gauge, which employs a capacitive sensor constructed largely of fused silica, operates over a range between zero and 120 000 Pa and has a precision of 1 Pa. The gauge was compared every month or two with the BIPM interferometric manobarmeter [11] which has an uncertainty of the order of 0,2 Pa. Between two comparisons one may consider that the atmospheric pressure within the balance enclosure was known to about 2 Pa.

Humidity was measured with a Hydrodynamics resistive transducer (based on lithium chloride) and its associated electronics. It was compared with an EG and G dew-point meter by means of circulating air in a closed circuit within the balance. This was done four times during the course of the third verification. The uncertainty in the measurement of relative humidity was probably less than 0,01.

The level of CO<sub>2</sub> was measured after the preparation of each *balancée*, by sampling air at the level of the balance pan, before the enclosure was shut. The measurement was made with a Lira 3000 infrared analyser made by MSA. To calibrate the instrument, use was made of standard mixtures of pure nitrogen and nitrogen containing  $900 \times 10^{-6}$  of CO<sub>2</sub>. The range that was calibrated has a maximum of  $1000 \times 10^{-6}$ .

In calculations, the volume used for each prototype was that determined at its initial calibration. The maximum volume difference between two standards that participated in the third verification was about  $0,12 \text{ cm}^3$ .

During the course of the third periodic verification, the following extreme values were recorded for temperature, atmospheric pressure, relative humidity and  $\text{CO}_2$  level:

- temperature:  $20,2 \text{ }^\circ\text{C}$  to  $21,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- atmospheric pressure:  $101\,260 \text{ Pa}$  to  $101\,500 \text{ Pa}$ ;
- humidity:  $0,45$  to  $0,54$ ;
- $\text{CO}_2$  level:  $550 \times 10^{-6}$  to  $750 \times 10^{-6}$ .

It should be noted that the pressure within the airtight enclosure of the balance was adjusted slightly to compensate for unusually high or low atmospheric pressure within the laboratory at the time the enclosure was sealed. Humidity in the laboratory is controlled to remain within the range given above.

If one wishes to avoid uncertainties greater than  $0,2 \text{ }\mu\text{g}$  in air buoyancy corrections, given a maximum volume difference of  $0,12 \text{ cm}^3$ , the density of air must be known to a relative uncertainty of about  $1 \times 10^{-3}$ . As can be inferred from the above, the uncertainty actually realised was far lower.

Finally, relative uncertainties intrinsic to the equation of state for the density of moist air (1981) or the (1981/91) version are well below  $1 \times 10^{-3}$  and are thus insignificant.

## APPENDIX 3

---

### Fabrication of prototypes in platinum-iridium

---

In the two published reports of the initial comparisons of the first forty platinum-iridium prototypes, among themselves and with the international prototype [13], as well as in the report of the second periodic verification of national prototypes [1], one may find a certain amount of information about the alloy composition and density of prototypes Nos. 1 to 61.

I wish, in this appendix, to provide similar information for the prototypes fabricated over the past twenty or so years (Nos. 62 to 80). These data may prove useful to the metrological community interested in mass. The term "prototype" refers to those platinum-iridium standards whose physical characteristics were determined by the BIPM and whose mass is 1 kg to within 1 mg. The list of "prototypes" is numbered from 1 to 80 (September 1993).

#### Platinum-iridium alloy — realization of the prototypes

All ingots were obtained from Johnson-Matthey Ltd. (London, UK). The alloy from which the prototypes are fabricated, nominally 90 % platinum and 10 % iridium, contains other metals in trace amounts. Spectroscopic and chemical analyses were performed on each ingot immediately after its fabrication and gamma-ray photography was used to verify the absence of cavities.

In the following list\*, artefacts fabricated from a common ingot are shown in the same line ; shown also is the year of fabrication :

Prototypes Nos. 62 and 63, 1972 ;

Prototypes Nos. 65 to 67 and standards Nos. 650 and 651, 1979 ;

Prototypes Nos. 68 to 73 and standard No. 690, 1981 ;

Prototypes Nos. 74 to 80, 1986.

Standards Nos. 650, 651, 690 and 691 are standards that fell below the acceptable tolerance (1 kg – 1 mg). Standard No. 651 was traded with the National Physical Laboratory (UK) in exchange for a rough casting supplied by Englehard (UK), from which No. 691 was fabricated.

The composition of the ingots is listed in Table IV.

TABLE IV  
*Alloy composition of platinum-iridium prototypes No. 62 to No. 80*

Nos.	62-63	64	65-66-67 650-651	68 to 73 690	74 to 80
Component	Mass fraction $\times 10^6$				
Iridium	98 700	100 400	97 000	97 500	99 600
Palladium	70	7	10	20	20
Rhodium	50	20	300	50	70
Silver	10	30	10	10	2
Boron	10	6			1
Calcium	1	2	< 1	< 1	< 1
Copper	20	6	50	100	20
Iron	50	10	100	200	20
Magnesium	1	< 1	< 1	< 1	< 10
Manganese			< 1		
Nickel	20		20	20	10
Gold	30	10	< 1	20	10
Lead	3				
Silicon	30	8	10		20
Platinum	remainder				

\* The same information, concerning certain of the older prototypes, has not been published elsewhere :

Nos. 41 and 42, 1928.

Nos. 43, 44 and 47, 1938.

Nos. 45, 46 and 48, 1938.

Nos. 49 and 50, 1949.

Nos. 60 and 61 (as well as E59, described in Appendix 4), 1963.

The ingots used for prototypes Nos. 62 to 64 were manufactured following the process described by A. Bonhore [14]. Later ingots were manufactured according to an amended procedure [12].

Rough cuttings from the ingots are brought to a mass some tens of grams above 1 kg. The density of the alloy is then determined at the BIPM for each rough cutting. The polishing and adjustment of Nos. 62 and 63 was achieved by applying successively finer grades of diamond paste. All prototypes with numbers between 64 and 80 were machined, adjusted and finished by diamond turning [12].

### Density determinations

The density of artefacts in the rough-cut state is determined by hydrostatic weighing using doubly distilled tap water from the BIPM as the reference standard. We take its density at 4 °C to be 999,972 kg·m<sup>-3</sup> and its thermal expansion to be that given by Chappuis [15].

In 1976 the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) recommended a density table for Standard Mean Ocean Water (SMOW) [16]. In this table, the density at 4 °C was taken to be 999,975 kg·m<sup>-3</sup> and the thermal expansion to be a weighted mean proposed by Bigg [17]. The density of doubly-distilled tap water at the BIPM is about 0,003 kg·m<sup>-3</sup> less than that of SMOW and thus has the value 999,972 kg·m<sup>-3</sup> [18]. In order to maintain continuity and homogeneity, the thermal expansion proposed by Chappuis has been kept. When a new table of water density is established by the Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM), it will thus be a simple matter to convert the values of density (or volume).

Since work on prototype No. 65 in 1980, we have corrected for the amount of dissolved gas in the water at the time of the hydrostatic weighings. The difference in density as a function of temperature between water saturated with dissolved air and degassed water has been studied by several investigators [19]. Research at the BIPM in 1981 [20] demonstrated that, at a fixed temperature, the effect on the density of water from dissolved air varies linearly with the amount of air relative to the amount at saturation.

Based on experimental procedures used at the BIPM until September 1993, we estimate that the level of dissolved atmospheric gas at the temperature of the hydrostatic weighings (about 22 °C) was approximately 0,6 times that of saturation for all measurements reported here.

Table V lists the densities determined for prototypes and standards since 1972. The spaces separate prototypes and standards fabricated from a single ingot. Note the narrow spread of densities from each ingot which suggests that the homogeneity of the material is excellent.

TABLE V

*Density at 0 °C of platinum-iridium prototypes No. 62 to No. 80  
and of standards Nos. 650, 651, 690, 691*

---

No.	Density/kg·m <sup>-3</sup>
62	21 546,64
63	21 546,68
64	21 555,98
65	21 535,30
66	21 535,27
67	21 535,40
650	21 535,37
651	21 535,15
68	21 544,82
69	21 544,53
70	21 544,57
71	21 545,10
72	21 544,68
73	21 544,62
690	21 544,65
74	21 557,34
75	21 557,23
76	21 557,27
77	21 557,32
78	21 557,33
79	21 557,37
80	21 557,31
691	21 534,38

## APPENDIX 4

---

### Documented history of platinum-iridium prototypes

---

- | No.   | Allocation  |
|-------|---|
| K1    | Official copy of $\text{Pt}_{10}\text{Ir}_{90}$ , as of 1889 <sup>(a)</sup> .   |
| 1     | Official copy of $\text{Pt}_{10}\text{Ir}_{90}$ as of 1889 <sup>(a)</sup> : removed from service in 1925 after having fallen and replaced as an official copy by No. 7 (not yet allocated).   |
| 2     | Allocated to Romania in 1891 (PV* 1891, p. 29).   |
| 3     | Allocated to Spain in 1889 <sup>(b)</sup> .   |
| 4     | Allocated to the United States of America in 1889 <sup>(b)</sup> .  |
| 5     | Allocated to Italy in 1889 <sup>(b)</sup> .   |
| 6     | Allocated to Japan in 1889 <sup>(b)</sup> .   |
| 7     | Official copy of $\text{Pt}_{10}\text{Ir}_{90}$ since 1925 (PV 1925, p. 62 ; 7th CGPM <sup>+</sup> , 1927, p. 79).  |
| 8(41) | Bears the number 41, but its accessories carry the number 8 : since there is no prototype marked 8, this prototype is referred to as 8(41) ; designated an official copy of $\text{Pt}_{10}\text{Ir}_{90}$ in 1905 (PV 1905, p. 110 ; 4th CGPM, 1907, p. 37). |
| 9     | Allocated to the BIPM in 1889 <sup>(b)</sup> ; fell in the Bunge balance in September 1949 (PV 1950, p. 32).  |
| 10    | Allocated to Portugal in 1889 <sup>(b)</sup> .  |
| 11    | Allocated to Serbia in 1889 <sup>(b)</sup> ; damaged in 1907 and replaced in 1925 by No. 29 which previously belonged to the Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, France (PV 1925, p. 15 and p. 82).  |
| 12    | Allocated to Russia in 1889 <sup>(b)</sup> .  |
| 13    | Allocated to France in 1889 <sup>(b)</sup> .  |
| 14    | Allocated to Austria in 1889 <sup>(b)</sup> .   |
| 15    | Allocated to Bavaria in 1889 <sup>(b)</sup> .   |
| 16    | Allocated to Hungary in 1889 <sup>(b)</sup> .   |

- 17 Allocated to France in 1889<sup>(b)</sup>, held by the Administration des Monnaies, then by the Service des Instruments de Mesure (PV 1952, p. 46) ; in 1993 was deposited at the Département Métrologie et Qualité in Ivry-sur-Seine, a division of the École des Mines of Douai (France).
- 18 Allocated to Great-Britain in 1889<sup>(b)</sup>.
- 19 Allocated to Italy in 1889<sup>(b)</sup>.
- 20 Allocated to the United States of America in 1889<sup>(b)</sup>.
- 21 Allocated to Mexico in 1891 (PV 1891, p. 28).
- 22 Allocated to Germany in 1889<sup>(b)</sup> ; damaged in Berlin in 1944.
- 23 Allocated to Finland in 1890 (PV 1890, p. 52).
- 24 Allocated to Spain in 1889<sup>(b)</sup>.
- 25 Allocated to France in 1889<sup>(b)</sup> ; held by the Observatoire de Paris until 1958 when purchased by the BIPM (PV 1958, p. 19).
- 26 Allocated to the Academy of St. Petersburg (Russia) in 1889<sup>(b)</sup>.
- 27 Allocated to Denmark in 1889<sup>(b)</sup> ; removed from service in 1946 and replaced by No. 48 in 1949 (PV 1950, p. 16).
- 28 Allocated to Belgium in 1889<sup>(b)</sup>.
- 29 Belonged to the Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, France until 1925 ; transferred to the Kingdom of the Serbs, Croats and Slovenians as a replacement for No. 11, which was damaged (PV 1925, p. 15).
- 30 Allocated to Japan in 1894 (PV 1894, p. 91).
- 31 Allocated to the BIPM in 1889<sup>(b)</sup> ; fell in the Bunge balance in February 1951 (PV 1952, p. 45).
- 32 Official copy of  $\mathfrak{K}$  as of 1905 (PV 1905, p. 110 ; 4th CGPM, 1907, p. 37).
- 33 Allocated to Austria in 1889<sup>(b)</sup>.
- 34 Allocated to France in 1889<sup>(b)</sup> ; kept by the Académie des Sciences de Paris.
- 35 Allocated to France in 1889<sup>(b)</sup>.
- 36 Allocated to Norway in 1889<sup>(b)</sup>.
- 37 Allocated to Belgium in 1889<sup>(b)</sup>.
- 38 Allocated to Switzerland in 1889<sup>(b)</sup>.
- 39 Allocated to Japan in 1894 (PV 1894, p. 91) ; in 1958, following World War II, it was ceded to the Republic of Korea.



- 40 Allocated to Sweden in 1889<sup>(b)</sup>.
- 41 Allocated to Czechoslovakia in 1929 (8th CGPM, 1933, p. 38) ; has belonged to the Slovak Republic since 1993.
- 42 Allocated to Turkey in 1935 (PV 1935, p. 26) ; removed from service in 1953 (PV 1954, p. 22) and exchanged for No. 54 ; No. 42 has since been kept at the BIPM where it is now known as No. 42' since it is always used in conjunction with a small added mass.
- 43 Official copy of ~~8~~ since 1939 (PV 1939, p. D 10).
- 44 Allocated to Australia in 1947 (PV 1948, p. 30).
- 45 Allocated to Argentina in 1939 (PV 1939, p. D 11) ; lost in 1986.
- 46 Allocated to the Dutch East Indies in 1939 (PV 1939, p. D 11), which became Indonesia.
- 47 Official copy of ~~8~~ since 1939 (PV 1939, p. D 10).
- 48 Allocated to Denmark in 1949 as a replacement for No. 27 (PV 1950, p. 16).
- 49 Allocated to Austria in 1951 (PV 1952, p. 30).
- 50 Allocated to Canada in 1951 (PV 1952, p. 30).
- 51 Allocated to Poland in 1952 (PV 1952, p. 30).
- 52 Allocated to Germany in 1954 (PV 1954, p. 22).
- 53 Allocated to Netherlands in 1953 (PV 1954, p. 22).
- 54 Allocated to Turkey in 1953 (PV 1954, p. 22) as a replacement for No. 42.
- 55 Allocated to Germany in 1954 (PV 1956, p. 45) ; following reunification in 1990, it has belonged to the Federal Republic of Germany.
- 56 Allocated to South Africa in 1955 (PV 1956, p. 25).
- 57 Allocated to India in 1958 (PV 1958, p. 19).
- 58 Allocated to the United Arab Republic in 1963 (PV 1964, p. 44) ; now belongs to the Arab Republic of Egypt.
- 59 Purchased by the National Research Laboratory of Metrology (Japan) from Stanton Instruments (United Kingdom) in 1963 ; included by error in the list of platinum-iridium prototypes ; at the NRLM bears the number E59.
- 60 Allocated to the People's Republic of China in 1963 (PV 1965, p. 39).
- 61 Allocated to the People's Republic of China in 1963 (PV 1965, p. 39) ; taken out of service in 1978 and replaced by No. 64.

- 62 Has belonged to the Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Turin, Italy since 1974 (PV 1974, p. 41).
- 63 Has belonged to the BIPM since 1974.  
(Prototypes Nos. 62 and 63 are the only two which were polished and adjusted using diamond paste.)
- 64 Allocated to the People's Republic of China in 1983 (PV 1984, p. 50) ; this is the first prototype to be finished and adjusted by diamond machining.
- 65 Allocated to Czechoslovakia in 1981 (PV 1982, p. 36) ; has belonged to the Slovak Republic since 1993.
- 66 Allocated to Brazil in 1983 (PV 1984, p. 50).
- 67 Has belonged to the BIPM since 1983 (PV 1984, p. 50).
- 68 Allocated to the Democratic People's Republic of Korea in 1987 (PV 1987, p. 37).
- 69 Allocated to Portugal in 1987 (PV 1987, p. 37).
- 70 Allocated to the Federal Republic of Germany in 1987 (PV 1987, p. 37).
- 71 Allocated to Israel in 1987<sup>(c)</sup>.
- 72 Allocated to the Republic of Korea in 1989<sup>(c)</sup>.
- 73 Has belonged to the BIPM since 1988<sup>(c)</sup>.
- 74 Allocated to Canada in 1989<sup>(c)</sup>.
- 75 Has belonged to the Hong Kong Government Standards and Calibration Laboratory, Hong Kong, since 1992<sup>(c)</sup>.
- 76 Has belonged to the Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Turin, Italy, since 1993 (PV 1994, to be published).
- 77 Has belonged to the BIPM since 1992<sup>(c)</sup>.
- 78 Not yet allocated.
- 79 Not yet allocated.
- 80 Not yet allocated.

---

\* PV : *Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures.*

+ CGPM : *Comptes Rendus Conf. Gén. Poids et Mesures.*

<sup>(a)</sup> 1st CGPM, 1889, p. 48.

<sup>(b)</sup> 1st CGPM, 1889, p. 40.

<sup>(c)</sup> distributed in 1993 after the third periodic verification of national prototypes of the kilogram.

BIBLIOGRAPHY

1. BONHOURE A., *BIPM Travaux et Mémoires*, 1966, **22**, C1-C71.
  2. *BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1986, **54**, 56-58.
  3. *BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1989, **57**, 15-16.
  4. GIRARD G., The washing and cleaning of kilogram prototypes at the BIPM, BIPM 1990, 19 pages.
  5. GIACOMO P., *Metrologia*, 1982, **18**, 33-40.
  6. DAVIS R. S., *Metrologia*, 1992, **29**, 67-70.
  7. ALMER H. E., *J. Res. N.B.S.*, 1972, **76C**, 1-10.
  8. *BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1974, **42**, 37-40.
  9. *BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1988, **56**, 59-61.
  10. *BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1983, **51**, 40-43.  
CARRÉ P., DAVIS R. S., *J. Res. N.B.S.*, 1985, **90**, 331-339.
  11. BONHOURE J., TERRIEN J., *Metrologia*, 1968, **4**, 59-68 and 148.
  12. QUINN T. J., *Platinum Metals Review*, Johnson Matthey, 1986, **30**, 74-79.  
*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1981, **49**, 40-43.
  13. TORNOË H., *BIPM Travaux et Mémoires*, 1890, **7**, 1-9.  
THIESEN M., *BIPM Travaux et Mémoires*, 1898, **9**, 3-21, B3-B48, C3-C48.
  14. BONHOURE A., *Microtecnic*, 1952, **VI**, 204-206.
  15. CHAPPUIS P., *BIPM Travaux et Mémoires*, 1907, **13**, D1-D41.
  16. IUPAC Commission I.4, Recommendation for Redetermination of the Absolute Density of Water, *Pure and Appl. Chem.*, 1976, **45**, 1-9.
  17. BIGG P. H., *Brit. J. Appl. Phys.*, 1967, **18**, 521-525.
  18. GIRARD G., MENACHÉ M., *C. R. Acad. Sci.*, Paris, 1972, **274**, Série B, 377-379.  
MENACHÉ M., BEAUVERGER C., GIRARD G., *Annales Hydrographiques*, Paris, 1978, **6**, N° 750, 37-76.
  19. BIGNELL N., *Metrologia*, 1983, **19**, 57-59.
  20. GIRARD G., COARASA M.-J., *Proc. Conf. Precise Measurement Fundamental Constants II*, 1981, NBS Special Pub. **617**, 1984, 453-459.
-



---

TABLE DES MATIÈRES  
TABLE OF CONTENTS

---

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

82<sup>e</sup> session (septembre 1993)  
82nd Meeting (September 1993)

---

	Pages
Liste des sigles utilisés dans le présent volume .....	V
List of acronyms used in the present volume .....	V
Le BIPM et la Convention du Mètre .....	XIII
Liste des membres du Comité international des poids et mesures .....	XV
Liste du personnel du Bureau international des poids et mesures .....	XVII
Ordre du jour de la session .....	XX
<b>Procès-verbaux des séances, 21, 22 et 23 septembre 1993.....</b>	<b>1</b>
1. Ouverture de la session ; quorum ; ordre du jour .....	1
2. Rapport du secrétaire du CIPM .....	2
3. Comités consultatifs .....	5
3.1 Comité consultatif pour la définition de la seconde .....	5
3.2 Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées .....	7
3.3 Comité consultatif de thermométrie .....	8
3.4 Réunions futures des comités consultatifs .....	9
4. Travaux du BIPM : Rapport du directeur.....	10
Travaux du BIPM .....	10
Dépôt des prototypes .....	11
5. Accréditation et certification des laboratoires nationaux de métrologie ...	12

6. La métrologie en chimie .....	16
7. Vingtième Conférence générale des poids et mesures, 1995 : discussion préliminaire .....	19
8. Questions administratives et financières .....	20
9. Questions diverses .....	23
9.1 Membres du CIPM .....	23
9.2 Groupe de travail sur l'application de la relativité générale à la métrologie .....	23
9.3 Prochaine session du CIPM .....	25
<b>Recommandations adoptées par le CIPM à sa 82<sup>e</sup> session .....</b>	<b>26</b>
1 (CI-1993) : Exactitude des étalons primaires de fréquence .....	26
2 (CI-1993) : Chronométrie des pulsars-milliseconde .....	27
3 (CI-1993) : Comparaison d'horloges à l'aide de techniques par laser visant des satellites .....	28
4 (CI-1993) : Contrôle de la stabilité du prototype international du kilogramme .	29
5 (CI-1993) : Mesures de la température thermodynamique .....	30
<b>Rapport du directeur sur l'activité et la gestion du Bureau international des poids et mesures (octobre 1992 - septembre 1993) .....</b>	<b>31</b>
I. Personnel.- Promotions (R. Davis, C. Colas, F. Lesueur). Engagement (D. Saillard), Chercheur associé (L. Vitouchkine). Étudiants en doctorat (P. Wolf, J. Åman). Départ (G. Girard) .....	31
II. Bâtiments .....	32
III. Travaux scientifiques .....	33
1. Remarques générales .....	33
1.1 Publications, conférences et voyages ne concernant pas directement une section particulière .....	38
1.1.1 Publication extérieure .....	38
1.1.2 Voyages (réunions, visites de laboratoires et d'instituts) .....	39
1.2 Activités en liaison avec des organismes extérieurs .....	40
2. Longueurs .....	40
2.1 Remarques générales .....	40
2.2 Mesures de longueur classiques .....	41
2.3 Lasers .....	41
2.3.1 Lasers à argon asservis sur l'iode en cuve externe à $\lambda \approx 515$ nm	41
2.3.2 Lasers à He-Ne asservis sur l'absorption saturée de l'iode en cuve externe à $\lambda \approx 543,5$ nm .....	42

2.3.3 Lasers à He-Ne asservis sur l'absorption saturée de l'iode en cuve interne ou externe à $\lambda \approx 612$ nm .....	43
2.3.4 Lasers à He-Ne asservis sur l'absorption saturée de l'iode en cuve interne à $\lambda \approx 633$ nm .....	43
2.3.5 Lasers à He-Ne asservis sur le méthane en cuve interne ou externe à $\lambda \approx 3,39$ $\mu\text{m}$ .....	45
2.3.6 Laser à $\text{CO}_2$ à $\lambda \approx 10,6$ $\mu\text{m}$ .....	46
2.3.7 Cuves à iode .....	47
2.3.8 Structure hyperfine .....	47
2.4 Publications, conférences et voyages : section des longueurs .....	47
2.4.1 Publications extérieures .....	47
2.4.2 Conférences et exposés .....	48
2.4.3 Voyages (réunions, visites de laboratoires et d'instituts) .....	48
2.5 Visiteurs de la section des longueurs .....	49
2.5.1 Stagiaires .....	49
2.5.2 Visiteurs .....	50
3. Masse et grandeurs apparentées .....	51
3.1 Troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme .....	51
3.2 La nouvelle balance à suspensions flexibles FB-2 .....	51
3.3 Effets de surface sur les étalons de masse en Pt-Ir .....	51
3.4 Anélasticité des lames flexibles et des fils de torsion .....	51
3.5 Effets magnétiques sur les pesées .....	52
3.6 Gravimétrie .....	52
3.7 Publications, conférences et voyages : section des masses .....	52
3.7.1 Publications extérieures .....	52
3.7.2 Voyages (réunions, visites de laboratoires et d'instituts) .....	52
3.8 Visiteurs de la section des masses .....	53
4. Temps .....	53
4.1 Temps atomique international (TAI) et Temps universel coordonné (UTC) .....	53
4.2 Algorithmes pour les échelles de temps .....	54
4.3 Liaisons horaires .....	55
4.3.1 Global Positioning System (GPS) .....	55
4.3.2 Global Navigation Satellite System (GLONASS) .....	56
4.3.3 Comparaisons horaires par aller et retour .....	56

4.3.4 Laser Synchronization from Satellite Orbit (LASSO) .....	57
4.4 Application de la relativité générale à la métrologie du temps .....	57
4.5 Pulsars .....	57
4.6 Autres activités .....	58
4.6.1 Laboratoire de temps .....	58
4.6.2 Radio-interférométrie à très longue base .....	58
4.7 Publications, conférences et voyages : section du temps .....	58
4.7.1 Publications extérieures .....	58
4.7.2 Rapports BIPM .....	59
4.7.3 Conférences et exposés .....	60
4.7.4 Voyages (réunions, visites de laboratoires et d'instituts) .....	60
4.8 Activités en liaison avec des organismes extérieurs .....	62
4.9 Visiteurs de la section du temps .....	62
4.9.1 Stagiaire .....	62
4.9.2 Visiteurs .....	62
5. Électricité .....	63
5.1 Résumé des travaux de la section d'électricité en 1993 .....	63
5.2 Potentiel électrique .....	63
5.2.1 Effet Josephson .....	63
5.2.2 Autres activités .....	65
5.3 Impédance électrique .....	65
5.3.1 Mise au point d'un étalon de résistance transportable fondé sur l'effet Hall quantique .....	65
5.3.2 Montage en série-parallèle de dispositifs pour l'effet Hall quantique .....	65
5.3.3 Mesures de capacités .....	66
5.4 Comparaisons bilatérales d'étalons électriques au BIPM .....	66
5.5 Mesures de bruit des étalons de tension .....	67
5.6 Comparaisons et étalonnages courants .....	68
5.7 Publications, conférences et voyages : section d'électricité .....	68
5.7.1 Publications extérieures .....	68
5.7.2 Conférences et exposés .....	69
5.7.3 Voyages (réunions, visites de laboratoires et d'instituts) .....	69
5.8 Activités en liaison avec des organismes extérieurs .....	70
5.9 Visiteurs de la section d'électricité .....	70
5.9.1 Stagiaires .....	70



5.9.2	Visiteurs .....	70
6.	Radiométrie, photométrie, thermométrie et manométrie .....	71
6.1	Radiométrie .....	71
6.2	Thermométrie et manométrie .....	72
6.3	Travaux d'étalonnage .....	72
6.4	Publications, conférences et voyages : section de radiométrie, photométrie, thermométrie et manométrie .....	73
6.4.1	Conférences et exposés .....	73
6.4.2	Voyages (réunions, visites de laboratoires et d'instituts) .....	73
6.5	Activités en liaison avec des organismes extérieurs .....	73
6.6	Visiteurs de la section de radiométrie, photométrie, thermométrie et manométrie .....	73
7.	Rayonnements ionisants .....	74
7.1	Dosimétrie .....	74
7.1.1	Rayons gamma et rayons x .....	74
7.1.2	Mesures neutroniques .....	76
7.2	Radionucléides .....	77
7.2.1	Mesures d'activité .....	77
7.2.2	Statistiques de comptage .....	80
7.3	Publications, conférences et voyages : section des rayonnements ionisants .....	82
7.3.1	Publications extérieures .....	82
7.3.2	Rapports BIPM .....	83
7.3.3	Voyages (réunions, visites de laboratoires et d'instituts) .....	83
7.4	Activités en liaison avec des organismes extérieurs .....	84
7.5	Visiteurs de la section des rayonnements ionisants .....	85
7.5.1	Stagiaires .....	85
7.5.2	Visiteurs .....	85
IV.	Publications du BIPM .....	86
1.	Publications générales .....	86
2.	Metrologia .....	86
V.	Réunions et exposés au BIPM .....	87
1.	Réunions .....	87
2.	Exposés .....	87
VI.	Certificats et notes d'étude .....	88
VII.	Comptes .....	91

**La troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme  
(1988-1992) ..... G 1**

English text of the report

The BIPM and the Convention du Mètre .....	101
Members of the Comité International des Poids et Mesures .....	103
Staff of the Bureau International des Poids et Mesures .....	105
Agenda.....	108
<b>Proceedings of the sessions, 21, 22 and 23 September 1993 .....</b>	<b>109</b>
1. Opening of the meeting; quorum; agenda .....	109
2. Report of the Secretary of the CIPM .....	110
3. Comités Consultatifs .....	112
3.1 Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde .....	112
3.2 Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées .....	114
3.3 Comité Consultatif de Thermométrie.....	115
3.4 Future meetings of Comités Consultatifs .....	116
4. Work of the BIPM: Report of the Director .....	117
Work of the BIPM.....	117
Dépôt des prototypes .....	118
5. Accreditation and certification of national metrology laboratories .....	119
6. Metrology in chemistry .....	122
7. Twentieth Conférence Générale des Poids et Mesures, 1995: preliminary discussion .....	125
8. Administrative and financial affairs .....	126
9. Other business.....	129
9.1 Changes in membership of the CIPM .....	129
9.2 Working group on the application of general relativity to metrology ...	129
9.3 Next CIPM meeting .....	130
<b>Recommendations adopted by the CIPM at its 82nd Meeting .....</b>	<b>131</b>
1 (CI-1993): Accuracy of primary frequency standards.....	131
2 (CI-1993): Timing of millisecond pulsars .....	132
3 (CI-1993): Clock comparison by satellite laser techniques.....	133

4 (CI-1993): Monitoring the stability of the international prototype of the kilogram.....	134
5 (CI-1993): Thermodynamic temperature measurements .....	135

**Director's Report on the Activity and Management of the Bureau International des Poids et Mesures (October 1992 - September 1993) .....** 137

I. Staff.- Promotions and changes of grade (R. Davis, C. Colas, F. Lesueur). Appointment (D. Saillard). Research Fellow (L. Vitushkin). Research Students (P. Wolf, J. Åman). Departure (G. Girard).....	137
II. Buildings .....	138
III. Scientific work .....	139
1. General introduction .....	139
1.1 Publications, lectures, travel not directly related to individual sections ..	144
1.1.1 External publications.....	144
1.1.2 Travel (committees, visits to laboratories and institutions) ...	144
1.2 Activities related to external organizations.....	145
2. Length .....	145
2.1 General remarks .....	145
2.2 Classical length measurement .....	146
2.3 Lasers.....	146
2.3.1 Iodine-stabilized argon lasers at $\lambda \approx 515$ nm using external cells .....	146
2.3.2 Iodine-stabilized He-Ne lasers at $\lambda \approx 543,5$ nm using external cells .....	147
2.3.3 Iodine-stabilized He-Ne lasers at $\lambda \approx 612$ nm using internal and external cells .....	148
2.3.4 Iodine-stabilized He-Ne lasers at $\lambda \approx 633$ nm using internal cells .....	148
2.3.5 Methane-stabilized He-Ne lasers at $\lambda \approx 3,39$ $\mu\text{m}$ using internal and external cells .....	150
2.3.6 CO <sub>2</sub> laser at $\lambda \approx 10,6$ $\mu\text{m}$ .....	151
2.3.7 Iodine cells .....	151
2.3.8 Hyperfine structure .....	151
2.4 Publications, lectures, travel: Length section.....	152
2.4.1 External publications.....	152
2.4.2 Lectures and presentations .....	153

2.4.3	Travel (committees, visits to laboratories and institutions) ...	153
2.5	Visitors to the Length section .....	154
2.5.1	Guest workers .....	154
2.5.2	Visitors .....	154
3.	Mass and related quantities .....	155
3.1	Third periodic verification of national prototypes of the kilogram ..	155
3.2	The new flexure-strip balance, FB-2 .....	156
3.3	Surface effects on Pt-Ir mass standards .....	156
3.4	Anelasticity in flexures and torsion fibres .....	156
3.5	Magnetic effects on weighing .....	156
3.6	Gravimetry .....	156
3.7	Publications, lectures, travel: Mass section .....	156
3.7.1	External publications .....	156
3.7.2	Travel (committees, visits to laboratories and institutions) ...	157
3.8	Visitors to the Mass section .....	157
4.	Time .....	158
4.1	International Atomic Time (TAI) and Coordinated Universal Time (UTC) .....	158
4.2	Algorithms for time scales .....	158
4.3	Time links .....	159
4.3.1	Global Positioning System (GPS) .....	159
4.3.2	Global Navigation Satellite System (GLONASS) .....	160
4.3.3	Two-way time transfer .....	160
4.3.4	Laser Synchronization from Satellite Orbit (LASSO) .....	161
4.4	Application of general relativity to time metrology .....	161
4.5	Pulsars .....	161
4.6	Other activities .....	162
4.6.1	Time laboratory .....	162
4.6.2	Very Long Baseline Interferometry .....	162
4.7	Publications, lectures, travel: Time section .....	162
4.7.1	External publications .....	162
4.7.2	BIPM reports .....	163
4.7.3	Lectures and presentations .....	163
4.7.4	Travel (committees, visits to laboratories and institutions) ...	164
4.8	Activities related to external organizations .....	165

4.9 Visitors to the Time section .....	166
4.9.1 Guest worker .....	166
4.9.2 Visitors .....	166
5. Electricity .....	166
5.1 Summary of the work of the Electricity section in 1993 .....	166
5.2 Electrical potential .....	167
5.2.1 Josephson effect .....	167
5.2.2 Other activities .....	168
5.3 Electrical impedance .....	168
5.3.1 Development of a transportable resistance standard based on the quantum Hall effect .....	168
5.3.2 Series and parallel connection of quantum Hall effect devices ..	169
5.3.3 Capacitance measurements .....	169
5.4 Bilateral comparisons of electrical standards at the BIPM .....	169
5.5 Measurements of noise in voltage standards .....	170
5.6 Comparisons and routine calibrations .....	171
5.7 Publications, lectures, travel: Electricity section .....	171
5.7.1 External publications .....	171
5.7.2 Lectures and presentations .....	172
5.7.3 Travel (committees, visits to laboratories and institutions) ...	172
5.8 Activities related to external organizations .....	173
5.9 Visitors to the Electricity section .....	173
5.9.1 Guest workers .....	173
5.9.2 Visitors .....	173
6. Radiometry, photometry, thermometry and pressure .....	173
6.1 Radiometry .....	173
6.2 Thermometry and pressure .....	175
6.3 Calibration work .....	175
6.4 Publications, lectures, travel: Radiometry, photometry, thermometry and pressure section .....	175
6.4.1 Lectures and presentations .....	175
6.4.2 Travel (committees, visits to laboratories and institutions) ...	176
6.5 Activities related to external organizations .....	176
6.6 Visitors to the Radiometry, photometry, thermometry and pressure section .....	176

7. Ionizing Radiations .....	176
7.1 Dosimetry.....	177
7.1.1 Gamma rays and x rays .....	177
7.1.2 Neutron measurements .....	179
7.2 Radionuclides .....	180
7.2.1 Activity measurements .....	180
7.2.2 Counting statistics .....	183
7.3 Publications, lectures, travel: Ionizing Radiations section .....	185
7.3.1 External publications.....	185
7.3.2 BIPM reports .....	185
7.3.3 Travel (committees, visits to laboratories and institutions) ...	186
7.4 Activities related to external organizations.....	186
7.5 Visitors to the Ionizing Radiations section .....	187
7.5.1 Guest workers .....	187
7.5.2 Visitors .....	187
IV. Publications of the BIPM .....	188
1. General publications.....	188
2. Metrologia .....	188
V. Meetings and lectures at the BIPM .....	189
1. Meetings .....	189
2. Lectures .....	189
VI. Certificates and Notes of Study .....	189
VII. Accounts .....	190

<b>The third periodic verification of national prototypes of the kilogram (1988-1992).....</b>	<b>G35</b>
--	------------