

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

PROCÈS - VERBAUX

DES SÉANCES

2^e SÉRIE — TOME 45

66^e SESSION — 1977

(20-22 septembre)



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Pavillon de Breteuil, F-92310 SÈVRES, France

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

ISBN 92-822-2049-4

NOTICE HISTORIQUE

Les organes de la Convention du Mètre

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

Le *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) a été créé par la *Convention du Mètre* signée à Paris le 20 mai 1875 par dix-sept États, lors de la dernière séance de la Conférence Diplomatique du Mètre. Cette Convention a été modifiée en 1921.

Le Bureau International a son siège près de Paris, dans le domaine (43 520 m²) du Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) mis à sa disposition par le Gouvernement français; son entretien est assuré à frais communs par les États membres de la Convention du Mètre (1).

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

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

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

La Conférence Générale est formée des délégués de tous les États membres de la Convention du Mètre et se réunit au moins une fois tous les six ans. Elle reçoit à chacune de ses sessions le Rapport du Comité International sur les travaux accomplis, et a pour mission :

- de discuter et de provoquer les mesures nécessaires pour assurer la propagation et le perfectionnement du Système International d'Unités (SI), forme moderne du Système Métrique;
- de sanctionner les résultats des nouvelles déterminations métrologiques fondamentales et 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 au moins une fois tous les deux ans. Le bureau de ce Comité adresse aux Gouvernements des États membres de la Convention du Mètre un *Rapport Annuel* sur la situation administrative et financière du Bureau International.

Limitées à l'origine aux mesures de longueur et de masse et aux études métrologiques en relation avec ces grandeurs, les activités du Bureau International ont été étendues aux étalons de mesure électriques (1927), photométriques (1937) et des rayonnements ionisants (1960). Dans ce but, un agrandissement des premiers laboratoires construits en 1876-1878 a eu lieu en 1929 et deux nouveaux bâtiments ont été construits en 1963-1964 pour les laboratoires de la Section des rayonnements ionisants.

Une trentaine de physiciens ou techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau International; ils font des recherches métrologiques ainsi que des mesures dont les résultats sont consignés dans des certificats portant sur des étalons des grandeurs ci-dessus. Le budget annuel du Bureau International est de l'ordre de 5 000 000 de francs-or, soit environ 2 000 000 de dollars U.S.

(1) Au 31 décembre 1977, quarante-cinq États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne (Rép. Fédérale d'), Allemande (Rép. Démocratique), Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, Canada, Chili, Chine (Rép. Pop. de), Corée (Rép. de), Danemark, Dominicaine (Rép.), Égypte, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran, Irlande, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Venezuela, Yougoslavie.

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

Les Comités Consultatifs ont un règlement commun (*Procès-Verbaux CIPM*, 31, 1963, p. 97). Chaque Comité Consultatif, dont la présidence est généralement confiée à un membre du Comité International, est composé d'un délégué de chacun des grands Laboratoires de métrologie et des Instituts spécialisés dont la liste est établie par le Comité International, de membres individuels désignés également par le Comité International et d'un représentant du Bureau International. Ces Comités tiennent leurs sessions à des intervalles irréguliers; ils sont actuellement au nombre de sept :

1. Le *Comité Consultatif d'Électricité* (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 γ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie α); cette dernière Section a été dissoute en 1975, son domaine d'activité étant confié à la Section II.
7. Le *Comité Consultatif des Unités* (CCU), créé en 1964.

Les travaux de la Conférence Générale, du Comité International, des Comités Consultatifs et du Bureau International sont publiés par les soins de ce dernier dans les collections suivantes :

- *Comptes rendus des séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures*;
- *Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures*;
- *Sessions des Comités Consultatifs*;
- *Recueil de Travaux du Bureau International des Poids et Mesures* (ce Recueil rassemble les articles publiés dans des revues et ouvrages scientifiques et techniques, ainsi que certains travaux publiés sous forme de rapports multicopiés).

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

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

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

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

AU 22 SEPTEMBRE 1977

Président

1. J. V. DUNWORTH, Ancien Directeur du National Physical Laboratory (Grande-Bretagne); aux bons soins du Directeur du BIPM, Pavillon de Breteuil, F-92310 *Sèvres* (France).

Vice-Président

2. P. HONTI, Ancien Vice-Président de l'Office National des Mesures, Németsvölgyi ut. 37-39, 1124 *Budapest*.

Secrétaire

3. J. DE BOER, Directeur de l'Institut de Physique Théorique, Université d'Amsterdam, Valckenierstraat 65, *Amsterdam-C*.

Membres

4. E. AMBLER, Acting Director, National Bureau of Standards, *Washington D.C. 20234*.
5. L. CINTRA DO PRADO, Professeur à l'Université de São Paulo, Alameda Rocha Azevedo 1274 (Apt. 71), *São Paulo, S.P. 01410*.
6. E. DJAKOV, Directeur de l'Institut d'Électronique, Académie des Sciences de Bulgarie, *Sofia 13*.
7. B. M. ISSAEV, Vice-Président du Comité d'État des Normes du Conseil des Ministres de l'U.R.S.S., Leninski prosp. 9 b, *Moscou M-49*.
8. D. KIND, Président de la Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 3300 *Braunschweig*.

9. F. J. LEHANY, Directeur du National Measurement Laboratory, P. O. Box 218, Bradfield Road, *Lindfield*, N.S.W. 2070 (Australie).
10. A. MARÉCHAL, Directeur Général de l'Institut d'Optique, 3-5, boulevard Pasteur, 75015 *Paris*.
11. J. M. OTERO, Ancien Président de la Junta de Energia Nuclear, Alfonso XII, 32, *Madrid* 14.
12. A. PERLSTAIN, Directeur du Bureau Fédéral des Poids et Mesures, Lindenweg 24, 3084 *Wabern* (Suisse).
13. H. PRESTON-THOMAS, Directeur Associé de la Division de Physique du Conseil National de Recherches, *Ottawa* K1A 0S1.
14. Y. SAKURAI, Directeur du National Research Laboratory of Metrology, 10-4, 1-Chome, Kaga, Itabashi-ku, *Tokyo*.
15. K. SIEGBAHN, Directeur de l'Institut de Physique, Box 530, 75121 *Uppsala* 1 (Suède).
16. J. STULLA-GÖTZ, Ancien Président du Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Gentzgasse 3, 1180 *Wien*.
17. A. R. VERMA, Directeur du National Physical Laboratory of India, Hillside Road, *New Delhi* 12.
18. ...

Membres honoraires

1. A. V. ASTIN, Director-Emeritus, National Bureau of Standards *Washington* D.C. 20234.
 2. G. D. BOURDOUN, Institut de Métrologie, Chaire de Métrologie, Vadkovski per. 3 a, Stankin, *Moscou* A-55.
 3. L. M. BRANSCOMB, Old Orchard Road, *Armonk*, N.Y. 10504.
 4. L. DE BROGLIE, de l'Académie Française, Secrétaire Perpétuel de l'Académie des Sciences, 94 rue Perronet, 92200 *Neuilly-sur-Seine*.
 5. N. A. ESSERMAN, 2/29 A Stawell Street, *Kew*, Victoria 3101.
 6. R. H. FIELD, 32 Highgate Gardens, *St. Michael* (Barbados).
 7. L. E. HOWLETT, 1702-71 Somerset Street W, *Ottawa*, Ontario K2P 2G2.
 8. M. KERSTEN, Knappstrasse 8, 3300 *Braunschweig*.
 9. M. SIEGBAHN, Frescati, Fack, 104 05 *Stockholm*.
-

LISTE DU PERSONNEL

DU

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

AU 1^{er} JANVIER 1978

Directeur : P. Giacomo
Sous-Directeur : T. J. Quinn

LABORATOIRES

Physiciens Chercheurs principaux

A. Allisy, P. Carré, A. Rytz.

Physiciens et Métrologistes

G. Leclerc, A. Sakuma, J. Hamon,
J. Bonhoure, J. W. Müller,
T. Witt, V. D. Huynh, G. Girard,
J.-M. Chartier, P. Bréonce,
D. Reymann, J. Azoubib.

Techniciens et Calculateurs

L. Lafaye, J. Hostache, C. Colas,
D. Carnet, F. Lesueur, C. Veyradier,
R. Felder, M^{me} J. Coarasa,
D. Avrons, C. Garreau, R. Pello,
D. Bournaud, M^{me} J.-M. Chartier,
M^{me} R. Czerwonka.

Atelier de mécanique

R. Michard.
G. Boutin, B. Bodson, J. Leroux,
C. Gilbert, J. Dias, F. Perez,
D. Rotrou.

ADMINISTRATION ET SERVICES

Métrologiste rédacteur

H. Moreau.

Administrateur

J. Gaillard.

Secrétaires

M^{lle} J. Monprofit, M^{mes} J. W.
Müller - Guégan, B. Petit,
L. Coquan-Delfour, B. Martin.

Gardiens

A. Montbrun, L. Lecoufflard.

Services d'entretien généraux

A. Gama.
3 employés (contractuels).

Directeurs honoraires : Ch. Volet, J. Terrien

ORDRE DU JOUR DE LA SESSION

1. Ouverture de la session; quorum; ordre du jour.
 2. Rapport du Secrétaire du CIPM.
 3. Rapports des Comités Consultatifs (CEMRI et Sections I, II, III; CCDS; CCPR) et de la réunion internationale sur les masses.
 4. Composition et réunions futures des Comités Consultatifs.
 5. Travaux du BIPM et visite des laboratoires.
 6. Questions administratives.
 7. Retraite du Directeur actuel. Conférence scientifique.
 8. Visite du Dépôt des prototypes métriques.
 9. Questions diverses.
-

66^e SESSION (SEPTEMBRE 1977)

PROCÈS-VERBAUX DES SÉANCES

TENUES À SÈVRES

Présidence de Mr J. V. DUNWORTH

Le Comité International des Poids et Mesures (CIPM) s'est réuni au Pavillon de Breteuil à Sèvres pour sa 66^e session du mardi 20 au jeudi 22 septembre 1977. Il a tenu six séances.

Étaient présents : MM. AMBLER, DE BOER, DJAKOV, CINTRA DO PRADO, DUNWORTH, HONTI, KIND, MARÉCHAL, PERLSTAIN, PRESTON-THOMAS, SAKURAI, SIEGBAHN, STULLA-GÖTZ, TERRIEN (directeur du BIPM).

Assistaient aussi aux séances : MM. GIACOMO (sous-directeur du BIPM) et QUINN (BIPM).

Interprète : Mr Vigoureux.

Excusés : MM. ISSAEV, LEHANY et OTERO.

Absent : Mr VERMA.

Secrétaire : M^{lle} Monprofit.

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

Le *Président* ouvre la séance en constatant que le quorum est atteint et que le CIPM peut donc délibérer valablement. Il soumet le projet d'ordre du jour à l'approbation du Comité.

Cet ordre du jour est adopté sans changement.

Le *Président* rappelle que l'événement important pour le Bureau International des Poids et Mesures cette année est l'adhésion de la République Populaire de Chine à la Convention du Mètre. Il signale que Mr Terrien est en relation avec les autorités chinoises pour examiner

l'éventualité de la participation des laboratoires de ce pays aux travaux des Comités Consultatifs. Il faut pour cela obtenir des renseignements sur les travaux poursuivis en Chine dans les domaines de compétence des Comités Consultatifs et sur les laboratoires qui effectuent ces recherches.

Le *Président* rappelle également que cette année le Comité doit déplorer le décès de M. Sandoval Vallarta. Depuis son élection en avril 1960, M. Sandoval Vallarta avait pris une part active aux travaux du CIPM, où tous ont pu apprécier ses remarques toujours claires et pleines de bon sens. Sur la demande du Président, une minute de silence est respectée à la mémoire de ce collègue disparu.

Mr de Boer, Secrétaire du CIPM, présente ensuite son rapport.

2. Rapport du Secrétaire du CIPM

(29 septembre 1976 — 20 septembre 1977)

1. *États membres de la Convention du Mètre.* — L'adhésion de la République Populaire de Chine a été notifiée au Gouvernement français par note verbale en date du 20 mai 1977 de son Ambassade à Paris. Le BIPM en a été informé par une lettre en date du 16 juin 1977 du Ministère des Affaires Étrangères, qui a pris aussi les dispositions pour la notification de cette adhésion aux Gouvernements parties à la Convention. C'est un très grand pays qui se joint à notre Organisation et la participation de ce pays à nos travaux contribuera à l'extension de la métrologie de précision et du Système International d'Unités dans le monde pour contribuer à notre œuvre.

Le nombre des États parties à la Convention du Mètre est maintenant 45.

2. Membres du CIPM

Décès. — Nous avons appris par la presse avec un profond regret le décès de notre éminent collègue Manuel Sandoval Vallarta, survenu à Mexico le 18 avril 1977 à l'âge de 78 ans. Nous avons pu apprécier sa compétence et sa courtoisie lors des réunions du CIPM dont il a été élu membre en avril 1960.

3. Réunions de Comités Consultatifs et réunion sur les masses

— *Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde* a tenu sa 8^e session sous la présidence de Mr J. V. Dunworth (26-28 avril 1977).

— *Le Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants* a tenu sa 7^e session sous la présidence de Mr E. Ambler (18-19 juillet 1977). Auparavant, les trois Sections se sont réunies :

— la *Section I* sous la présidence de Mr W. A. Jennings (2-4 mai 1977),

— la *Section II* sous la présidence de Mr P. J. Champion (14-16 juin 1977),

— la *Section III* sous la présidence de Mr R. S. Caswell (30 mai-1^{er} juin 1977).

— *Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie* a tenu sa 9^e session sous la présidence de Mr A. Maréchal (7-9 septembre 1977).

— De plus, une réunion internationale portant sur les étalons de masse et leur comparaison a été organisée par le BIPM après une préparation par correspondance; elle s'est tenue sous la présidence de Mr J. Terrien (23-24 novembre 1976).

Toutes ces réunions ont eu lieu au Pavillon de Breteuil.

4. *Bureau du CIPM.* — En préparation de la présente session du CIPM, le bureau du Comité a examiné — soit par correspondance, soit lors de ses réunions, soit lors de ses rencontres à l'occasion de réunions internationales — diverses questions concernant les activités du BIPM et de ses Comités Consultatifs. Il a pris quelques décisions concernant des cas particuliers et des modalités d'application des règles en vigueur, telles que: contributions financières de la République Démocratique Allemande, pension de retraite des ménages de gardiens du BIPM.

5. *Indications financières.* — Le tableau ci-après donne la situation de l'actif du BIPM, en francs-or, au 1^{er} janvier des années portées en tête de colonne :

	1974	1975	1976	1977
Fonds ordinaires	2 979 898,93	4 448 364,62	5 455 315,24	5 304 386,84
Caisse de Retraites	544 116,71	682 419,48	855 396,40	1 096 293,67
Fonds spécial pour l'amélioration du matériel scientifique.....	39 465,59	39 465,59	39 465,59	0
Caisse de prêts sociaux	4 316,88	7 156,34	10 811,45	31 968,15
Totaux	3 567 798,11	5 177 406,03	6 360 988,68	6 432 648,66

L'actif du « Fonds spécial pour l'amélioration du matériel scientifique » a été épuisé par l'achat d'un ordinateur (décembre 1976).

Ce rapport est adopté à l'unanimité.

3. Rapports des Comités Consultatifs; rapport sur la réunion concernant les masses

Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS)

Le *Président* demande à Mr Terrien de présenter le rapport de la 8^e session du CCDS (*voir* p. S 1). L'ordre du jour du CCDS comportait un exposé sur les progrès des horloges atomiques et des étalons à jet de césium réalisant la définition de la seconde. Les trois étalons les plus perfectionnés sont ceux de la PTB, du NBS et du NRC. Ils donnent des fréquences qui sont en accord entre elles, avec une incertitude de quelques 10^{-13} . Au 1^{er} janvier 1977, l'intervalle unitaire de 1 s du TAI a été ajusté pour le rendre égal à la valeur la meilleure que l'on connaisse de la seconde définie par la fréquence de la transition hyperfine du césium.

Mr Guinot, directeur du Bureau International de l'Heure (BIH), a fait devant le CCDS un rapport sur l'établissement du TAI dont le BIH est responsable. L'une des difficultés actuelles est que l'établissement et la diffusion du TAI sont limités en précision par les transmissions. La transmission des indications des horloges est faite principalement au moyen des émissions hertziennes du système de navigation « LORAN-C ». Elle subit des fluctuations qui peuvent atteindre $0,5 \mu\text{s}$ en une année ou en quelques années. Un autre moyen de transmission consiste à transporter

des horloges par avion d'un lieu à un autre. Le LORAN-C a l'avantage d'être toujours disponible, mais sa portée, limitée à l'Europe et à l'Amérique du Nord, ne permet pas d'inclure de façon régulière dans TAI les résultats donnés par les horloges situées en Asie et en Australie. On étudie actuellement une troisième méthode qui utilise les satellites de télécommunication. Ce problème de transmission est le plus important dans l'établissement du TAI.

Le CCDS a aussi été informé de l'adoption du Temps Universel Coordonné (UTC) dans plusieurs pays pour définir l'heure légale.

Il a été demandé au BIH de mettre en œuvre le pilotage du TAI; cette opération a pour but de maintenir l'exactitude de l'intervalle unitaire du TAI, c'est-à-dire de le maintenir conforme aux meilleures réalisations expérimentales de la définition de la seconde. Le CCDS a discuté sur les méthodes à employer. En effet, si l'on corrige l'intervalle unitaire du TAI chaque fois qu'un grand laboratoire donne une nouvelle détermination de la seconde, on risque d'avoir de légères discontinuités dans la marche du TAI. Un algorithme proposé par Mr Guinot a été adopté. Le pilotage du TAI constitue une grande responsabilité qui repose uniquement sur l'initiative du directeur du BIH. Il a donc été décidé de créer un Groupe de travail pour conseiller le directeur du BIH. C'est l'objet de la Recommandation S 1 (1977) (p. S 11). Le directeur du BIH a l'intention de rédiger un rapport sur la mise en œuvre du pilotage pendant l'année 1977 et sur ses intentions futures. Ce rapport sera envoyé aux membres du Groupe de travail pour susciter leurs commentaires. D'après ces commentaires, on pourra juger de l'utilité ou de la nécessité de réunir le Groupe de travail.

Mr *Dunworth*, en tant que président du CCDS, tient à faire remarquer que, même s'il existe encore de nombreux problèmes pour le pilotage du TAI, il y a lieu de se féliciter des résultats déjà obtenus; l'essentiel de l'établissement du TAI est déjà accompli et ce, grâce à la collaboration de nombreux pays.

Le rapport du CCDS est approuvé.

Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants (CCEMRI)

Mr *Ambler* présente le rapport qu'il a préparé à la suite des récentes réunions du CCEMRI et de ses Sections I, II, III (*voir* p. R 1). Il souligne d'abord les besoins en étalons de mesure dans le domaine des rayonnements ionisants; il expose ensuite le programme d'activité, puis ce qui a déjà été fait et le plan des recherches futures pour chaque section du CCEMRI.

Pour la Section I, des comparaisons des mesures d'exposition au moyen d'instruments de transfert ont été faites avec le NBS et le NPRL (Afrique du Sud); les résultats concordent à 5×10^{-3} près, ce qui est très satisfaisant.

Il subsiste la question importante de la grandeur propre à exprimer les effets des rayonnements X et γ . Pour le moment on se sert de l'exposition. Mais ne devrait-on pas se servir du kerma, ou de la dose absorbée?

L'installation au BIPM d'une source très puissante de ^{60}Co a permis d'effectuer des comparaisons des mesures de dose absorbée dans le graphite avec les étalons du NBS et du LMRI (France). Là aussi les résultats sont satisfaisants. On envisage de nouvelles comparaisons avec le NPL, la PTB, le RIV (Pays-Bas) et l'OMH (Hongrie).

En ce qui concerne les travaux de la Section II, Mr Ambler espère que de nouveaux résultats seront obtenus pour la prochaine Conférence Générale. Il y a maintenant au BIPM une installation de mesure comportant des chambres d'ionisation $4\pi\gamma$, ce qui permet aux laboratoires de vérifier l'accord de leurs mesures d'activité d'émetteurs γ avec celles des autres pays. Onze laboratoires ont déjà pris part à de telles comparaisons.

Par ailleurs, une comparaison de mesures d'activité d'une solution de ^{139}Ce a été faite avec 22 laboratoires. Ce radionucléide est utilisé en médecine, ce qui explique l'intérêt particulier qui lui est porté.

En ce qui concerne la Section III, des comparaisons de mesures de débit de fluence de neutrons monocinétiques seront achevées d'ici à la fin de 1977. Les neutrons sont de plus en plus utilisés en médecine; il est par conséquent nécessaire de comparer les instruments de mesure.

Le *Président* fait remarquer que c'est un domaine où tous les détails sont importants et il remercie Mr Ambler pour son rapport détaillé.

Mr *Siegbahn* tient à exprimer la grande confiance qu'il a dans ces travaux. Il a été particulièrement frappé par l'excellence des monographies qui ont été préparées; il souhaiterait qu'elles soient publiées dans des revues d'accès facile.

Mr *Ambler* répond que cette question a été abordée par le CCEMRI; il arrive en effet que les publications faites sous l'égide du CIPM et du BIPM ne soient pas très accessibles.

Mr *Siegbahn* accepterait de publier les monographies du CCEMRI dans la revue *Nuclear Instruments and Methods* dont il est l'éditeur. Mr *Ambler* en parlera aux auteurs et à Mr *Campion* qui préside la section intéressée du CCEMRI.

Le Comité approuve les rapports du CCEMRI et de ses trois Sections.

Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR)

Mr *Maréchal* rend compte de la 9^e session du CCPR qui s'est tenue quelques jours avant la présente session du CIPM. Cette session du CCPR a été présidée en partie par Mr *Terrien*, car Mr *Maréchal*, empêché par de graves raisons personnelles, n'a pu en diriger tous les travaux.

Il convient de rappeler que le CCPR a tenu en 1975 à Teddington une session qui a été consacrée principalement à la « philosophie générale »

de la définition des unités; en effet, il paraissait souhaitable aux yeux des physiciens de remédier à l'absence actuelle de cohérence entre les unités physiques d'une part et d'autre part des unités comme les unités photométriques qui présentent des aspects physiologiques. En 1975, la tendance était de tenter de définir de façon plus précise le lumen en fonction du watt.

A l'approche de la session de 1977, de nombreuses suggestions ont été faites; le CCPR disposait d'un dossier qui comprenait une trentaine de documents exprimant les opinions diverses des participants à ce sujet. Mr *Maréchal* souligne l'opinion formulée par Mr Terrien sur le problème général des unités dans le cas des grandeurs qui comportent un facteur biologique. Il y a là une question fondamentale: doit-on utiliser des unités purement physiques pour ces grandeurs? On est quelquefois embarrassé pour définir la grandeur elle-même; de plus, on a souvent affaire à des phénomènes non linéaires pour lesquels il est difficile de définir une unité.

Des diverses opinions exprimées il se dégage deux tendances. Sur le plan de la logique pure, on devrait essayer d'utiliser le watt dans tous les domaines où les grandeurs peuvent être ramenées à une puissance et en particulier en photométrie. L'autre tendance se fonde essentiellement sur des objections de caractère pratique: les unités photométriques sont déjà universellement utilisées, il paraît donc difficile de condamner l'utilisation de ces unités.

Le rapport définitif du CCPR (*voir p. P 1*) ne pouvant être présenté au CIPM, Mr *Maréchal* soumet seulement les quatre recommandations proposées par le CCPR (*voir p. P 20*).

A une question de Mr *Ambler*, Mr *Terrien* répond que la Recommandation P 3 (lumen comme unité de base avec une définition en fonction du watt) est celle qui a la préférence de la majorité du CCPR; la Recommandation P 4 (candela comme unité de base avec une définition en fonction du watt) constitue une possibilité pour le cas où la Recommandation P 3 ne serait pas acceptée. Le CCPR est conscient du fait que ces recommandations doivent être examinées par le Comité Consultatif des Unités (CCU), comme il se doit pour un changement dans la liste des unités de base ou pour un changement de la définition d'une unité.

Mr *Djakov* indique que sa préférence va à la Recommandation P 3. D'après lui, la candela figure parmi les unités de base pour des raisons historiques et non pour des raisons logiques, physiques ou pratiques. La caractéristique fondamentale d'une source lumineuse est le flux lumineux et non l'intensité lumineuse. Les lampes d'éclairage sont caractérisées par leur flux lumineux, en lumens, et non par leur intensité, en candelas. Le remplacement d'une unité de base par une autre est possible et il n'est pas dangereux si la grandeur des unités reste la même. L'évolution du SI est inévitable. C'est une question très importante que Mr *Djakov* souhaite voir discuter par le CCU.

Mr *de Boer* confirme que le CCU devra donner son avis sur l'opportunité d'abandonner la candela.

Bien que le NBS ait été en faveur de la Recommandation P 3, la préférence de Mr *Ambler* va vers la Recommandation P 4. Elle permettrait de ne pas changer l'unité de base, ce qui constitue un avantage appréciable : comme l'ensemble de la question des unités de base et des unités comportant un facteur biologique risque d'entraîner des discussions prolongées, on pourrait utiliser les mesures spectrophotométriques sans attendre qu'une décision soit prise sur le fond de la question.

Pour des raisons pratiques, Mr *Perlstein* est favorable à la Recommandation P 4. Dans de nombreux pays on vient seulement d'introduire le SI, il serait donc malencontreux de changer déjà une unité. On peut changer une définition sans changer l'unité elle-même. Cela constitue une solution heureuse sinon logique. On maintiendrait le système inchangé mais on l'adapterait aux mesures radiométriques avec la nouvelle définition proposée.

Mr *Terrien* rappelle que l'on a changé la définition du mètre et celle de la seconde sans changer les unités. On peut opérer de même pour la candela.

Le seul inconvénient qu'il y a à conserver la candela comme unité de base est qu'il existe d'autres grandeurs photobiologiques qui posent un problème comparable; on risque d'avoir besoin de nouvelles unités de base pour ces grandeurs. C'est pourquoi il propose d'adopter la Recommandation P 1 dont les « considérants » rappellent qu'on ne doit pas augmenter le nombre des unités SI sans des raisons impératives.

Mr *Ambler* souhaite que la Recommandation P 1 soit soumise à l'étude du CCU. D'après lui, si le CIPM adoptait cette Recommandation, il devrait adopter le watt pour exprimer les grandeurs photométriques. Il est peut-être prématuré que le CIPM prenne cette décision.

En ce qui concerne la Recommandation P 2 (valeur de l'efficacité lumineuse spectrale), Mr *Ambler* constate avec plaisir que le CCPR se prononce en faveur des mesures spectroradiométriques, car la réalisation du corps noir présente de grandes difficultés alors que les mesures radiométriques sont plus exactes.

Mr *Kind* appuie l'opinion de Mr *Ambler* et exprime sa satisfaction de voir le CCPR admettre comme principe général la réalisation de la candela au moyen de mesures spectroradiométriques.

Mr *Terrien* ne partage pas entièrement l'opinion de Mr *Ambler* au sujet de l'exactitude des mesures spectroradiométriques : les avis sur ce point sont partagés. Ce qui importe à ses yeux, c'est que le corps noir au point de congélation du platine est d'une réalisation expérimentale difficile et que l'équipement nécessaire à cette réalisation ne sert à rien d'autre. La précision obtenue avec cette méthode est médiocre. L'accord entre les différents laboratoires est de $\pm 1\%$. Au contraire, la spectroradiométrie est une technique de plus en plus utilisée par les laboratoires.

Si la candela ou le lumen sont réalisés à partir du watt, tout l'équipement utilisé peut continuer à servir pour d'autres expérimentations.

En conclusion, la Recommandation P 2 est approuvée par le CIPM. Les Recommandations P 1, P 3 et P 4 seront soumises au CCU pour étude.

Réunion internationale sur les masses

La parole est donnée à Mr Quinn, rapporteur de cette réunion (*voir* le rapport p. A 1).

Mr *Quinn* rappelle que cette réunion faisait suite à la Résolution 3 de la 15^e CGPM qui demandait de poursuivre les études concernant les étalons de masse. Un questionnaire préalable avait été envoyé aux laboratoires nationaux. Les réponses à ce questionnaire ont permis d'établir l'ordre du jour en fonction des questions soulevées par les laboratoires.

Le premier problème abordé est celui de la conservation des étalons de masse. Il faut étudier la façon dont les étalons, qu'ils soient en platine iridié ou en acier inoxydable, évoluent à long terme par suite de la pollution superficielle; l'accroissement de masse que l'on constate généralement peut être réduit, comme l'a montré une étude préliminaire effectuée au BIPM.

Le second point est le problème du nettoyage des étalons de masse. Il faut utiliser des méthodes différentes selon que les étalons sont en platine iridié ou en acier inoxydable. Les méthodes sont variées; elles font appel à des solvants organiques, au lavage classique à l'eau ou même au lavage par ultrasons. Le nettoyage ne doit évidemment entraîner aucune usure. L'efficacité du nettoyage dépend essentiellement de l'état de surface de l'étalon. C'est un sujet qui mérite beaucoup d'attention.

Le troisième point concerne les effets des conditions ambiantes sur la conservation de la masse. Au BIPM, on a constaté que des modifications de l'humidité ambiante entraînent des modifications de la masse des étalons. L'effet semble réversible mais avec une constante de temps de plusieurs jours. Des travaux comparables à la PTB ont donné des résultats analogues.

De même, lorsque la pression atmosphérique varie, la masse des étalons en acier inoxydable ne varie pas de la même façon que celle des étalons en platine iridié. Au NBS, des comparaisons de ce type ont été faites entre les laboratoires de Gaithersburg et ceux de Boulder; la différence d'altitude entre ces deux villes étant d'environ 1 600 m, on a constaté avec étonnement qu'il n'était pas possible de concilier les résultats.

Un autre problème est celui du choix éventuel de nouveaux matériaux pour les masses étalons d'usage courant. Des recherches sur divers alliages ont été faites à l'INM, au NPL et à la PTB. Des recherches ont aussi été faites pour utiliser le silicium qui fournit un bon étalon de masse volumique; mais la fragilité du silicium ne rend guère possible son utiliza-

tion comme remplaçant éventuel du platine iridié pour la fabrication d'étalons de masse.

On a aussi longuement discuté sur les améliorations que l'on peut apporter aux balances. Les balances de précision coûtent extrêmement cher, et rares sont les fabricants qui acceptent de les construire. Il y a également un problème pour entretenir ces balances : les laboratoires n'ont pas le personnel qualifié nécessaire pour assurer cet entretien et les rares constructeurs sont très réticents pour réviser les meilleures balances.

Le dernier problème soulevé lors de cette réunion concernait la correction de poussée de l'air. Les données et les formules utilisées dans différents laboratoires pour calculer cette correction conduisent à des différences significatives. Il faudrait se mettre d'accord sur les meilleures données connues et sur une formule commune à utiliser pour évaluer cette correction.

Trois Groupes de travail ont été chargés de l'étude de questions précises : la conservation des étalons de masse, le calcul de la correction de poussée de l'air et la détermination de la masse volumique de l'air. Il a été demandé au BIPM d'organiser ensuite des comparaisons d'étalons de masse en acier inoxydable et en platine iridié.

Mr *Kind* exprime sa satisfaction pour le travail fait à l'occasion de cette réunion. A son avis, il n'est pas nécessaire de créer un Comité Consultatif pour s'occuper des étalons de masse.

Mr *Terrien* tient à remercier Mr Sakurai pour son intervention auprès d'une société japonaise qui a accepté de se charger de la remise en état de la balance Rueprecht du BIPM.

Mr *Terrien* mentionne pour mémoire l'exposé qui a été fait par G. Girard (BIPM) à l'Assemblée Générale de l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée en août 1977. Cet exposé portait sur l'état d'avancement des travaux de redétermination de la masse volumique de l'eau faits par un certain nombre de laboratoires nationaux. Ce rapport n'appelle pas de discussion de la part du CIPM.

4. Composition et réunions futures des Comités Consultatifs

CCE : aucune suggestion de changement n'a été faite depuis la nomination en 1976 de deux laboratoires comme nouveaux membres.

CCPR : deux propositions sont faites. L'une concerne l'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris (Italie) dont l'un des physiciens a été invité à la 9^e session qui vient de se tenir. L'autre proposition concerne Mr J. Schanda qui travaille à Budapest et qui remplit aussi des fonctions importantes dans la Commission Internationale de l'Éclairage ; il pourrait assurer une bonne liaison entre la CIE et le CCPR.

Ces deux propositions de nouveaux membres sont acceptées.

Mr *Maréchal* fait part de son désir d'abandonner la présidence du

CCPR, son activité professionnelle ne le conduisant plus à s'occuper de spectroradiométrie. Comme le CCPR aura de plus en plus à s'intéresser à ce domaine, il souhaite être remplacé.

Le *Président* remercie Mr Maréchal pour son action à la présidence du CCPR.

CCT: il y a eu de nouvelles nominations à ce Comité Consultatif au cours des récentes années et tous les laboratoires intéressés sont représentés.

CCDM, CCDS, CCU: aucune proposition de modification n'est faite cette année.

CCEMRI: Mr *Ambler* signale que Mr *Campion* (NPL) ne travaille plus dans le domaine des rayonnements ionisants; il a cependant accepté de conserver provisoirement la présidence de la Section II de ce Comité Consultatif.

Pour cette Section II, il est proposé d'introduire trois nouveaux membres: le NPRL (Afrique du Sud) qui a été invité à la dernière réunion de cette Section et qui a participé avec une grande efficacité à la comparaison du cérium 139, et deux experts, Mr J.-J. *Gostely* (Institut d'Électrochimie et Radiochimie, Lausanne) et Mr H. *Vonach* (Institut für Radiumforschung und Kernphysik, Vienne).

Pour la Section III, il est suggéré d'introduire le Laboratoire de Métrologie des Rayonnements Ionisants (Saclay, France).

Ces propositions de nouveaux membres des Sections du CCEMRI sont acceptées.

Mr *Kind* se demande s'il n'est pas nécessaire de limiter le nombre des membres des Comités Consultatifs et s'il n'y aurait pas lieu de remplacer certains participants plutôt que d'en ajouter de nouveaux.

Mr *Terrien* rappelle qu'en principe une refonte complète de la composition des Comités Consultatifs est faite après chaque Conférence Générale. Dans le passé, la composition de certains comités a été profondément modifiée. Cela a été le cas par exemple pour le CCDS après l'adoption de la nouvelle définition de la seconde; cette définition étant du domaine de la physique atomique, il n'était plus nécessaire que le CCDS comprenne une représentation importante des astronomes.

Une autre considération entre en jeu. Certains pays ne prennent pas part aux travaux du CIPM, il est donc important pour eux de travailler au sein des Comités Consultatifs.

Si l'on juge que le nombre des participants à un comité est trop grand, il peut être intéressant de créer des groupes de travail chargés de l'étude de sujets particuliers. Mr *Lehany* a d'ailleurs suggéré que l'on pourrait procéder ainsi pour le Comité Consultatif d'Électricité.

Réunions futures

CCE: en septembre 1978*.

CCT: du 9 au 11 mai 1978.

CCU : il devrait se réunir vers la fin du mois de mai 1978; Mr Preston-Thomas souhaite que le CCT et le CCU se réunissent à des dates voisines*.

CCEMRI : réunion en 1979, avant la Conférence Générale.

CCDM : aucune réunion n'est envisagée.

CCDS : ce Comité s'étant réuni en 1977, il n'y a pas à prévoir de réunion en 1978.

CCPR : aucune réunion n'est prévue pour 1978.

5. Travaux du BIPM

La deuxième séance du Comité est entièrement consacrée à l'exposé des travaux effectués par le BIPM au cours de l'année écoulée.

Mr Giacomo et les responsables des différentes sections présentent les points saillants de ces travaux, dont le détail est décrit dans le Rapport du Directeur (*voir* p. 21).

Les travaux de bâtiment en cours dans l'Observatoire ont interrompu les travaux métrologiques dans les salles de photométrie, pyrométrie, dilatométrie et à la base géodésique, depuis janvier 1977. L'activité normale devrait reprendre au début de 1978, dans des conditions sensiblement améliorées.

L'acquisition de données sur ruban magnétique (mini-cassettes) déjà expérimentée pour les mesures de longueur, a été adaptée aux mesures d'activité et aux mesures neutroniques. L'amélioration est appréciable, au moins sur deux points : augmentation du nombre des mesures et suppression des reports de données, générateurs d'erreurs.

La comparaison des *mesures de règles divisées* mise en route en juillet 1976 progresse lentement. Deux laboratoires seulement ont terminé leurs mesures.

L'étude de la stabilité à long terme des *lasers asservis* sur l'iode se poursuit. Sur trois ans, les écarts observés restent inférieurs à 5×10^{-11} . Le BIPM ne possédait jusqu'ici qu'un seul laser asservi sur le méthane; on a entrepris d'en construire plusieurs autres, afin d'étudier leurs performances (stabilité, reproductibilité, influences diverses) et de pouvoir effectuer des comparaisons avec les autres laboratoires.

La réunion sur les *masses* a mis l'accent sur l'importance des problèmes relatifs à la conservation des étalons de masse. Le BIPM étudie des enceintes non étanches mais qui assureraient une protection efficace contre les particules diverses en suspension dans l'air. Les premiers résultats sont très encourageants.

* *Note ajoutée aux épreuves* : Le CCE se réunira du 13 au 15 septembre 1978, et le CCU du 17 au 19 mai 1978.

Le BIPM participe aux *travaux du Bureau International de l'Heure*. L'ajustement du TAI au 1^{er} janvier 1977 et son pilotage à partir des données des meilleurs étalons de fréquence à jet de césium devraient assurer une exactitude de la seconde de TAI de l'ordre de 1×10^{-13} . Les problèmes posés par ce pilotage, essentiellement discontinu, font l'objet d'études permanentes.

Le *gravimètre* transportable construit en collaboration avec l'Istituto di Metrologia G. Colonnetti (Turin) a permis d'établir treize nouvelles stations gravimétriques entre Hammerfest (Norvège) et Catane (Sicile). La station gravimétrique construite à Mizusawa (Japon) avec l'aide du BIPM devrait entrer en service vers la fin de 1978.

L'étude du *point triple du méthane* ($T \approx 90$ K) a montré une excellente reproductibilité, meilleure que celle du point triple de l'argon; on peut envisager de substituer le premier au second dans l'EIPT.

La mise en œuvre de l'*effet Josephson* pour conserver le volt permet maintenant d'étudier la stabilité des piles étalons du BIPM, toujours utilisées comme étalons de travail. Ces piles doivent être conservées dans des enceintes thermorégulées particulièrement soignées; leur dérive est alors suffisamment régulière pour permettre une interpolation, entre deux étalonnages, à environ 10 nV près. Toutefois, on a observé des sauts accidentels, rares mais imprévisibles, de l'ordre de 100 nV.

Des comparaisons internationales partielles des réalisations de l'ohm et du volt remplacent maintenant avantageusement les grandes comparaisons simultanées, condamnées par leur durée excessive.

La nouvelle source intense de cobalt 60 (170 TBq) et le fantôme de graphite ont permis la comparaison des mesures de *dose absorbée* à l'aide d'une chambre d'ionisation et à l'aide des calorimètres apportés au BIPM par deux autres laboratoires; l'accord est excellent (quelques 10^{-3}). On a pu mettre en évidence des effets liés à la masse volumique du graphite et à ses défauts d'homogénéité. Les effets observés peuvent atteindre quelques 10^{-3} pour des variations de masse volumique de l'ordre de 3×10^{-2} .

L'installation de référence pour les mesures relatives d'*activité* d'émetteurs γ fonctionne maintenant en permanence. Des contrôles périodiques permettent de s'assurer de sa stabilité. De nombreux laboratoires ont déjà eu recours à ce service.

L'étude des *statistiques* de comptage se poursuit. On a étudié l'effet des coïncidences fortuites dans les méthodes de comptage qui utilisent les coïncidences β - γ par exemple.

La comparaison internationale des mesures de débit de fluence de *neutrons* monocinétiques est pratiquement achevée. Le BIPM a assuré le transport et la mise en œuvre des instruments de transfert dans les différents laboratoires. Grâce à l'aménagement de sa source de neutrons, il a pu depuis peu participer aux mesures pour les neutrons d'énergie 14,8 MeV (en plus de l'énergie 2,5 MeV).

Cette présentation donne aux membres du personnel du BIPM l'occasion de répondre aux questions que leur posent les membres du CIPM.

En conclusion de ces exposés, le *Président* félicite le personnel pour son activité toujours digne du renom du BIPM et de la confiance du Comité.

La séance du mercredi matin 21 septembre est consacrée à la visite des laboratoires.

6. Questions administratives

Mr *Terrien* présente le rapport de l'expert-comptable pour l'exercice 1976. Il fait remarquer qu'en 1976 le BIPM n'a effectivement perçu, par suite de retards dans le paiement des contributions des États, qu'un peu plus de 75 % du montant voté des contributions.

Dans l'exercice 1977 en cours figure une somme importante de 245 000 francs-or au titre des recettes diverses; cette somme représente un versement fait par le Gouvernement du Japon en règlement d'instruments fabriqués par le BIPM pour les installations de la station gravimétrique de Mizusawa et un versement du Gouvernement français pour l'achat d'un Kilogramme prototype en platine iridié.

Dans ce même exercice, les dépenses de bâtiments dépasseront les prévisions par suite de divers travaux nécessaires pour l'aménagement du sous-sol de l'Observatoire: pose d'une canalisation d'évacuation des eaux usées par gravité, installation d'un monte-charge et aménagement d'une nouvelle salle. Ce dépassement des dépenses a été autorisé par le bureau du CIPM.

En revanche, on avait fait des économies sur ce poste en 1976.

Mr *Preston-Thomas* note que les augmentations du poste « Voyages » dépassent l'augmentation des prix; il demande s'il y a davantage de déplacements.

Mr *Terrien* répond qu'il y a un accroissement non seulement des voyages du personnel mais aussi des transports de matériel comme par exemple pour la comparaison de lasers; pour les comparaisons de mesures neutroniques, un physicien du BIPM a également été appelé à se déplacer fréquemment avec ses appareils.

Mr *de Boer* demande pourquoi le poste « Bibliothèque » n'est pas épuisé. Mr *Terrien* répond que les travaux de réorganisation de la bibliothèque, pour lesquels une somme avait été prévue, ont toujours été remis.

Mr *Preston-Thomas* pense qu'il serait prudent d'avoir un poste « Ajustement de la réserve de trésorerie » dans les prévisions budgétaires. Mr *de Boer* répond que cette façon de voir n'a pas l'agrément de certains États adhérents à la Convention du Mètre. De l'avis de Mr *Terrien* il est souhaitable que le BIPM ait au moins une année de réserves.

Le rapport de l'expert-comptable pour l'exercice 1976 est approuvé et quitus est donné au Directeur et à l'Administrateur.

Le projet de budget pour 1978 ne donne pas lieu à commentaires particuliers et est approuvé.

Budget pour 1978

	Francs-or
Contributions des États	6 445 000
Intérêts des fonds	350 000
Taxes de vérification	5 000
Remboursements des taxes sur les achats	150 000
Total	<u>6 950 000</u>

DÉPENSES

A. <i>Dépenses de personnel :</i>		
1. Traitements	3 200 000	} 4 110 000
2. Allocations familiales	193 000	
3. Sécurité sociale	187 000	
4. Assurance-accidents	30 000	
5. Caisse de Retraites	500 000	
B. <i>Dépenses de fonctionnement :</i>		
1. Bâtiments (entretien)	360 000	} 1 470 000
2. Mobilier	40 500	
3. Laboratoires et ateliers	583 000	
4. Chauffage, eau, énergie électrique	160 000	
5. Assurances	20 000	
6. Impressions et publications	65 000	
7. Frais de bureau	100 000	
8. Voyages	125 000	
9. Bureau du Comité	16 500	
C. <i>Dépenses d'investissement :</i>		
1. Laboratoires	780 000	} 920 000
2. Atelier de mécanique	50 000	
3. Atelier d'électronique	60 000	
4. Bibliothèque	30 000	
D. <i>Frais divers et imprévus</i>		350 000
E. <i>Utilisation de monnaies non convertibles</i>		100 000
Total		<u>6 950 000</u>

7. Retraite du directeur J. Terrien
Conférence scientifique

L'un des points marquants de l'ordre du jour de la présente session comportait les manifestations en l'honneur de Mr J. Terrien qui doit quitter la direction du BIPM à la fin de 1977. La séance de l'après-midi du 21 septembre est consacrée à ces manifestations.

A l'ouverture de la séance, le *Président Dunworth* se plaît à reconnaître en Mr Terrien un homme sage et un bon scientifique, qui a guidé avec habileté et dévouement toutes les affaires du BIPM, auquel il a consacré l'essentiel de son existence. Mais c'est au scientifique que le Comité tient à rendre hommage pendant sa quatrième séance à laquelle de nombreuses personnalités scientifiques ont été conviées, ainsi que le personnel du BIPM.

Mr J. de Boer, secrétaire du CIPM, Mr J. Coulomb, président de l'Académie des Sciences de Paris, Mr P. Jacquinet, directeur du Laboratoire Aimé Cotton (Orsay) et Mr D. Kind, président de la PTB (Braunschweig), présentent les conférences scientifiques dont le texte est reproduit en annexe (p. B 1). Mr Honti, vice-président du CIPM,

clôt la séance en remerciant les orateurs et en félicitant de nouveau Mr Terrien.

Cette séance est suivie, après la visite du caveau des prototypes métriques, d'une réception au Pavillon de Breteuil au cours de laquelle le Président remet à Mr Terrien, au nom du CIPM, en présence des invités et des membres du personnel du BIPM, un cadeau symbolique. Il s'agit d'un modèle de la section en X des Mètres prototypes, calculée par Tresca, modèle fabriqué par l'atelier du BIPM, ajusté pour que sa masse soit égale à 1 kg, et gravé au nom de J. Terrien.

8. Visite du Dépôt des Prototypes métriques

Procès-Verbal

Le 21 septembre 1977, à 17 heures, en présence des membres du Comité International des Poids et Mesures et du personnel scientifique du Bureau, il a été procédé à la visite du Dépôt des Prototypes métriques internationaux du Pavillon de Breteuil

On avait réuni les trois clefs qui ouvrent le Dépôt : celle qui est confiée au Directeur du Bureau, celle qui est déposée aux Archives Nationales, à Paris, et que Monsieur Le Pesant 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	20,3 °C
« maximale	24 °C
« minimale	19 °C
État hygrométrique	80 %

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

*Le Directeur
du Bureau,*

J. TERRIEN

*Le Conservateur en Chef
des Archives de France,*

M. LE PESANT

*Le Président
du Comité,*

J. V. DUNWORTH

9. Questions diverses

Groupe de travail sur les incertitudes. — Mr Ambler avait écrit au directeur du BIPM pour attirer son attention sur un problème complexe, celui des incertitudes et de la façon dont on devrait exprimer les résultats de mesures. Le BIPM est bien placé pour s'occuper de cette question qui n'est résolue dans aucun pays. Le problème est celui du traitement des incertitudes dans la pratique. Deux sections du CCEMRI ont signalé l'importance de ce problème. La théorie des erreurs aléatoires est bien connue, mais pour les erreurs systématiques on ne fait en réalité que des estimations; celles-ci dépendent de l'expérimentateur et il n'existe pas

de méthode unique, généralement acceptée, pour combiner les erreurs systématiques aux erreurs aléatoires.

Pour les laboratoires d'étalonnage ou de vérification, le problème se présente de façon un peu différente. Les clients de ces laboratoires veulent un nombre unique traduisant l'exactitude des mesures ou des instruments soumis à l'étalonnage et permettant par exemple de juger de leur conformité à un cahier des charges. Les usages diffèrent d'un laboratoire à l'autre, entraînant une fâcheuse incohérence.

Si le CIPM pense que ce problème est de sa compétence, Mr *Ambler* demande qu'il crée un groupe de travail qui préparerait un rapport pour la prochaine session.

Mr *Kind* appuie cette proposition de création d'un comité *ad hoc*.

Un groupe de travail sera donc créé sous la présidence de Mr *Giacomo*; il sera constitué de représentants des laboratoires nationaux et des organismes intéressés (OIML, ISO, CEI, etc.).

Mr *Terrien* souligne que ce problème des erreurs est très vaste. La raison essentielle pour laquelle le CIPM doit s'y intéresser est qu'à l'heure actuelle beaucoup d'organismes sont en train d'étudier cette question. On risque de les voir émettre des recommandations contradictoires et de se trouver alors devant une situation inextricable.

Il ne s'agit pas pour le CIPM de fixer des règles arbitraires, mais il serait bon que le CIPM donne des lignes directrices; il pourrait par exemple suggérer la méthode la plus convenable dans des cas particuliers.

Le *Président* demande si l'un des membres du CIPM souhaite faire partie de ce groupe de travail. Il pose en particulier la question à Mr *Perlstein* qui réserve sa réponse. Mr *Perlstein* indique que l'ISO et la CEI, par exemple, se sont intéressées depuis longtemps à ce problème. Il s'est avéré impossible de concilier les points de vue très divergents des différents groupes de spécialistes concernés.

Il est certain que cette question des erreurs intéresse au premier chef les utilisateurs, mais elle doit être réglée par des scientifiques. Mr *Terrien* souhaite que les laboratoires nomment pour ce groupe de travail des personnes qui sont en contact direct avec les utilisateurs.

Mr *Giacomo* est conscient du fait qu'il sera difficile de réunir un groupe efficace, donc restreint, de personnes compétentes. Il a l'intention de prendre contact avec les laboratoires en leur adressant un questionnaire et d'éviter d'attaquer de front l'ensemble du problème car il est trop vaste; pour commencer, il faut choisir un ou deux aspects sur lesquels un progrès sensible peut être réalisé.

Mr *Kind* conseille de limiter l'importance du groupe pour en assurer l'efficacité. Il souhaite qu'il rassemble des physiciens compétents sur ce sujet.

Emploi temporaire du barn. — Mr *de Boer* rappelle qu'il n'y a pas eu cette année de réunion du Comité Consultatif des Unités, mais il veut soumettre au CIPM un problème concernant le « barn ». Concurrément

au SI, on a maintenu temporairement un certain nombre d'unités, dont le barn. Dans une lettre reçue de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique, on a attiré son attention sur le fait que le Conseil des Communautés Européennes (CEE) a prescrit une date limite pour l'abandon de certaines unités, en particulier du barn et de l'ångström. A l'heure actuelle, il est difficile d'envisager d'abandonner le barn. La protestation de l'AIEA est fondée. Mr *de Boer* pense qu'il appartient au CIPM d'exprimer son avis auprès de la CEE. Il faut admettre pour le moment l'utilisation du barn avec le SI.

Mr *Ambler* signale qu'il a reçu lui aussi de la correspondance sur ce même sujet. Il est heureux que le CIPM envisage d'intervenir et de préciser qu'il n'a pas l'intention d'éliminer le barn pour le moment.

Mr *Honti* pense que la CEE n'est pas le seul organisme à avoir pris une telle décision. A sa connaissance il en est de même du « Comecon ». Si le CIPM prend une position, il faut la communiquer aux autres organismes.

Mr *de Boer* précise que la réclamation reçue ne concerne que la CEE. Le CIPM n'a aucune information officielle sur les décisions prises par le « Comecon ». D'ailleurs, il ne s'agit pas d'une modification des décisions du CIPM. La CEE a interprété le terme « temporairement » en indiquant une date limite, ce qui n'a jamais été dans les intentions du CIPM.

Mr *Perlstain* craint qu'il y ait une ambiguïté due au terme « temporairement ». A son avis, certaines associations ont tendance à prendre ce mot comme une invitation à faire disparaître les unités en question.

Le *Président* considère l'interprétation comme évidente : il s'agit de maintenir ces unités jusqu'à ce qu'elles ne soient plus nécessaires.

Pour Mr *Cintra do Prado*, il ne devrait pas y avoir de confusion sur l'intention des rédacteurs de la brochure sur le SI puisqu'il existe un tableau (N° 12) des unités « déconseillées ». Il est d'avis de maintenir le barn dans le tableau 10, comme une unité admise temporairement, mais non déconseillée.

Mr *Preston-Thomas* estime que le mot « temporairement », de même qu'en anglais « temporarily », implique qu'il y aura une fin à cette utilisation.

Pour Mr *de Boer*, la CEE a pris une décision unilatérale.

Il est finalement convenu que Mr *de Boer*, en tant que Secrétaire du CIPM, écrira aux autorités de la CEE pour les informer de la position du CIPM.

Mr *Kind* souhaite qu'une copie de cette lettre soit envoyée aux membres du CIPM et que ceux-ci soient autorisés à en faire état si nécessaire.

Désignation de l'ensemble des organes de la Convention du Mètre. — Le *Président* fait part d'une proposition du bureau du Comité. Il n'existe pas de nom couvrant l'ensemble des organes issus de la Convention du Mètre, c'est-à-dire à la fois la CGPM, le CIPM et ses Comités Consultatifs et le BIPM. La proposition faite par Mr *Honti* est d'appeler cet ensemble

« Organisation Intergouvernementale de la Convention du Mètre », avec le sigle OICM. Cette proposition a été considérée avec intérêt par le bureau du Comité, car elle répond en effet à un besoin.

Mr *de Boer* se demande si l'on doit dire « intergouvernementale » ou « internationale ». Selon lui le CIPM n'est pas « intergouvernemental », seule la CGPM l'est.

Mr *Perlstain* suggère de demander l'avis du Ministère des Affaires Étrangères de France, puisqu'il est dépositaire du traité de la Convention du Mètre.

Le *Président* pense que la question devrait être soumise à la prochaine Conférence Générale. Il y aura lieu de préparer un projet de résolution à cet effet.

Cotisation de la République Populaire de Chine. — Ainsi que le CIPM en a été informé, la Chine est partie au traité de la Convention du Mètre depuis le 20 mai 1977. La représentation diplomatique de la Chine à Paris a demandé officiellement de ne payer pour 1977 qu'une contribution partielle tenant compte de son entrée en cours d'année. Jusqu'ici, lorsqu'un pays adhère à la Convention du Mètre, on lui demandait de verser sa contribution pour la totalité de l'année en cours. Si l'on accède au désir de la Chine, cela constituera un précédent.

Le directeur du BIPM a informé les autorités chinoises que la décision était du ressort du CIPM. Il est bien entendu que la cotisation d'entrée due une fois pour toutes et égale au montant de la cotisation annuelle devra être réglée dans sa totalité.

Le CIPM donne son accord pour que les sommes dues par la République populaire de Chine pour 1977 soient calculées sur la base d'une cotisation d'entrée normale et d'une cotisation partielle pour 1977.

Metrologia. — Mr *Preston-Thomas* présente un rapport sur son activité comme rédacteur en chef de cette revue. Il souhaite être remplacé dans cette fonction qu'il assume depuis bientôt dix ans. Le *Président* et Mr *de Boer* lui demandent de bien vouloir se charger de cette tâche pendant encore un an, ce que Mr *Preston-Thomas* accepte.

Publications du BIPM. — Mr *de Boer* s'informe de la diffusion des publications du BIPM et souhaite savoir à qui elles sont envoyées. Mr *Terrien* rappelle que le BIPM a un certain nombre de correspondants dans tous les pays. De plus, nous envoyons plusieurs exemplaires de toutes nos publications aux Ambassades à Paris des pays membres de la Convention du Mètre, à charge pour elles de les adresser aux services intéressés dans leur pays. Mr *Terrien* rend hommage aux membres du CIPM qui font paraître des comptes rendus dans certaines revues nationales.

Démission de Mr Stulla-Götz. — Mr *Stulla-Götz* demande la parole :

« Il y a quelques mois, dans une lettre au Président, j'ai fait part de mon intention de mettre à votre disposition mon siège de membre

du CIPM. Je le fais pour des raisons personnelles, compte tenu de mon âge (j'ai plus de 76 ans) et de ma situation familiale. Cela n'a pas été pour moi une décision facile à prendre, mais je suis heureux d'avoir eu le privilège de participer depuis 1954 aux travaux du Comité International, en particulier à la création du Système International d'Unités. Je suis reconnaissant d'avoir participé aux travaux du Comité sous la présidence de Sears, Danjon, Vieweg, Howlett, Otero et de vous-même, Mr le Président Dunworth. Mais je crois que le moment est venu de faire mes adieux. »

Le *Président* rappelle qu'en effet Mr Stulla-Götz a été élu par la 10^e Conférence Générale en même temps que le Dr Astin et Mr Barrell, qu'à l'époque il travaillait comme conseiller auprès du Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen à Vienne. Mr Stulla-Götz a également siégé au Comité Consultatif des Unités et au Comité Consultatif pour la Définition du Mètre. Il a été aussi président de l'Organisation Internationale de Métrologie Légale. Au nom de tous, le *Président* le remercie de sa grande activité en tant que membre du CIPM.

Dates de la 16^e CGPM et de la 67^e session du CIPM

Le *Président* soulève la question de la date de la prochaine Conférence Générale. Il rappelle que la convocation à une Conférence Générale doit être notifiée aux Gouvernements environ un an à l'avance. La dernière Conférence a eu lieu au mois de mai 1975. Un certain nombre de délégations ont exprimé leur préférence pour cette période de l'année. Si la prochaine Conférence se tient en mai 1979, les Convocations devront être envoyées avant la prochaine session du CIPM. Mr *Terrien* pense que, s'il en est ainsi, le CIPM devra se réunir en mai 1978 pour être en mesure d'étudier le projet de Convocation et surtout les projets de résolutions à soumettre au vote de la Conférence.

Après quelques échanges de vues, le Comité préfère s'en tenir à la coutume et convoquer la 16^e Conférence Générale pour l'automne 1979. Par conséquent, la prochaine session du CIPM aura lieu du 19 au 22 septembre 1978; la date de la 16^e Conférence Générale sera fixée à cette session.

*

L'ordre du jour étant épuisé, le *Président* souhaite une heureuse retraite à Mr Terrien et, avant de lever la séance, il propose de le nommer directeur honoraire du BIPM; cette nomination est approuvée par applaudissements.

Le *Président* clôt la 66^e session du CIPM et donne rendez-vous à ses collègues pour la prochaine session du CIPM où la direction du BIPM sera assurée par Mr Giacomo, assisté de Mr Quinn comme sous-directeur.

*
* *

Le Ministère des Affaires Étrangères de France avait tenu à s'associer à l'hommage rendu à Mr Terrien en l'invitant, ainsi que M^{me} Terrien,

les membres du CIPM, Mr Giacomo et Mr Quinn, à un dîner qui a eu lieu le 22 septembre. Mr J. Coulomb, président de l'Académie des Sciences de l'Institut de France, avait bien voulu accepter de présider ce dîner. L'assistance a observé une minute de silence à la mémoire de Mr Ribo, sous-directeur aux Affaires Consulaires et aux Unions Internationales, et à ce titre correspondant du BIPM au Ministère des Affaires Étrangères, décédé quelques jours auparavant, qui devait représenter le Ministre à ce dîner.

RAPPORT DU DIRECTEUR

SUR L'ACTIVITÉ ET LA GESTION DU BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

(octobre 1976 — septembre 1977)

I. — PERSONNEL

Nominations

J. BONHOURS, métrologue principal, a été nommé physicien principal.

T. WITT, physicien, a été nommé adjoint avec le grade de physicien principal.

G. GIRARD, métrologue, a été nommé adjoint avec le grade de métrologue principal.

P. BRÉONCE, technicien principal, a été nommé métrologue.

Ces nominations ont pris effet au 1^{er} janvier 1977; les nominations des deux nouveaux adjoints résultent du vote du CIPM à sa session de 1976.

P. GIACOMO, sous-directeur, a été nommé directeur désigné, par vote unanime du CIPM le 30 septembre 1976, pour succéder à J. TERRIEN dont la départ à la retraite aura lieu le 1^{er} janvier 1978.

Engagements

Raymond FELDER, né en 1946, stagiaire de l'Institut National de Métrologie, Paris, a été engagé comme technicien principal le 1^{er} février 1977.

Terence J. QUINN, né le 19 mars 1938 à Farnham (Grande-Bretagne), précédemment « Senior Principal Scientific Officer » au National Physical Laboratory, Teddington, a été désigné par vote unanime du CIPM le 30 septembre 1976 pour prendre les fonctions de sous-directeur le 1^{er} janvier 1978. Il est entré au BIPM le 1^{er} septembre 1977 comme physicien chercheur principal.

Mlle D. Guégan, secrétaire principale, s'est mariée en septembre 1977 avec J. W. Müller, adjoint au BIPM.

II. — BÂTIMENTS

Observatoire

Les difficultés rencontrées dans les déplacements d'appareils encombrants nécessitent l'installation d'un monte-charge (charge maximale 1 t, surface

utile 1,2 m × 2 m) entre le sous-sol et le rez-de-chaussée. Cette installation est en cours à l'extérieur du bâtiment, à son extrémité nord.

Simultanément, on établit sur toute la longueur du bâtiment un réseau de canalisations d'évacuation des eaux usées desservant les salles en sous-sol, pour mettre fin à la crainte permanente d'inondations. Le sous-sol de la salle 3 est en cours d'aménagement; on disposera ainsi d'une nouvelle salle de travail.

Grand Pavillon

La dernière réfection de la Salle de conférences remontait à 1960; non seulement les peintures en étaient considérablement défraîchies, les murs salpêtrés, le plafond fissuré et écaillé, mais l'installation électrique était mal adaptée et insuffisante.

En conséquence, après la réfection en profondeur des bas de murs entreprise en septembre 1976, l'installation électrique a été entièrement refaite et l'éclairage a été renforcé par des lampes à incandescence montées à la partie supérieure des bibliothèques, à la place des tubes fluorescents, et par quatre nouvelles appliques; le plafond a été réparé, lessivé et repeint, les murs ont été lessivés et tapissés, les boiseries restaurées et repeintes et le grand lustre a été redoré.

Par ailleurs, les deux bureaux du Secrétariat ont été entièrement repeints (murs et plafonds).

Petit Pavillon

L'emménagement au Pavillon de Breteuil, en août 1977, du sous-directeur désigné a nécessité au préalable divers travaux dans l'appartement de fonction: l'installation électrique et les installations sanitaires ont été rénovées et complétées, la cuisine a été réaménagée avec un ensemble d'éléments encastrables, les peintures et les tapisseries ont été refaites, les parquets ont été rejointés, poncés et vitrifiés, les huisseries rénovées et certaines portes remplacées.

L'office a été agrandi par la suppression d'une cloison vétuste et l'incorporation du couloir correspondant; le dallage de l'office et celui de la cuisine ont été refaits avec des tomettes identiques pour les deux pièces. La fenêtre de l'office a été entièrement rénovée et le vasistas de la cuisine a été agrandi en fenêtre.

Dépendances

Un curage complet des canalisations souterraines des eaux usées a été effectué et devra désormais être entrepris régulièrement tous les ans en raison de la prolifération des écheveaux de racines.

Cinquante-six ormes morts, du fait de la maladie qui atteint ces arbres depuis quelques années, ont été abattus; une trentaine avaient déjà dû être abattus les années précédentes. Une centaine de jeunes hêtres ont été plantés en remplacement.

III. — INSTRUMENTS ET TRAVAUX

Remarques générales

Je voudrais signaler particulièrement les engagements de nouveau personnel, et aussi les travaux de bâtiment qui rendront disponible une salle de travail supplémentaire et qui amélioreront les conditions de travail dans les salles du sous-sol de l'Observatoire.

L'ensemble du programme de travail a progressé normalement, toujours en étroite collaboration avec les laboratoires nationaux.

Parmi les progrès accomplis, quelques-uns sont un peu plus marquants :

— le BIPM a organisé des mesures comparatives internationales de longueur, portant sur deux règles divisées spécialement étudiées et dont l'une a été spécialement construite;

— la conservation des étalons du volt est définitivement assurée par l'effet Josephson;

— l'étude des balances, des étalons de masse et de la conservation de ces derniers est engagée sur le plan international, à la suite d'une réunion organisée par le BIPM le 23 novembre 1976;

— la source intense de rayons γ du cobalt 60 est prête pour les mesures comparatives de dose absorbée;

— une source de neutrons d'énergie 14 MeV est maintenant disponible, en plus de la source d'énergie 2,5 MeV;

— les études et les préparatifs pour l'utilisation de microprocesseurs vont permettre d'accroître et de faciliter nos travaux de mesure.

Dans l'exposé qui suit, les noms des responsables des travaux décrits sont cités entre parenthèses. L'astérisque (*) placé après un nom signale une personne qui ne fait pas partie du personnel permanent du BIPM : membres du groupe de Recherche de Dosimétrie (Paris) qui travaillent au BIPM conformément à l'arrangement conclu avec le Ministère français des Affaires Sociales (*Procès-Verbaux CIPM*, 32, 1964, p. 14), et physiciens ayant effectué un stage de longue durée.

Longueurs (P. Carré, J. Hamon)

Comparateur photoélectrique et interférentiel

Le *dispositif d'enregistrement de données numériques sur ruban magnétique* précédemment décrit (Rapport 1976, p. 27), dont les essais effectués en septembre 1976 ont donné pleinement satisfaction, a été mis en service de façon régulière dès le mois suivant. Nous avons mis fin au contrat de location de la perforatrice de cartes que nous utilisions auparavant; elle est avantageusement remplacée par le nouveau dispositif qui n'a manifesté jusqu'à maintenant aucune défaillance.

Étalons à traits

Comparaisons internationales

Les comparaisons internationales de mesure de règles divisées organisées par le BIPM et commencées en juillet 1976 (Rapport 1976, p. 29) se pour-

suivent. Les deux règles (N° 12924 de 1 m et N° 16806 de 0,5 m) ont été étudiées au NML (Australie) et expédiées au NRC (Canada) où elles sont parvenues le 9 février 1977. Selon les prévisions du NRC (juillet 1977) l'étude de la règle de 1 m devait être terminée le 20 juillet et celle de la règle de 0,5 m fin août. Le rapport du NML sur l'étude qu'il a effectuée est en cours de préparation.

Un neuvième laboratoire, l'Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Turin, nous a fait part de son désir de participer aux comparaisons. Il sera inclus dans le second circuit sauf si la circulation doit être étendue à d'autres laboratoires, ce qui nous amènerait à prévoir un troisième circuit.

Règles divisées

Deux règles ont été étudiées au comparateur photoélectrique.

— Règle N° 4795 de 1 m en acier au nickel (Polski Komitet Normalizacji i Miar, Varsovie) : équation de l'intervalle principal.

La valeur obtenue est :

$$N^{\circ} 4795 = 1 \text{ m} - 3,78 \mu\text{m} \text{ à } 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (novembre 1976).}$$

En septembre 1973, nous avons obtenu : 1 m — 3,53 μm . La figure 1 montre l'évolution de cette règle d'après les résultats de mesures antérieures qui nous ont été communiqués.

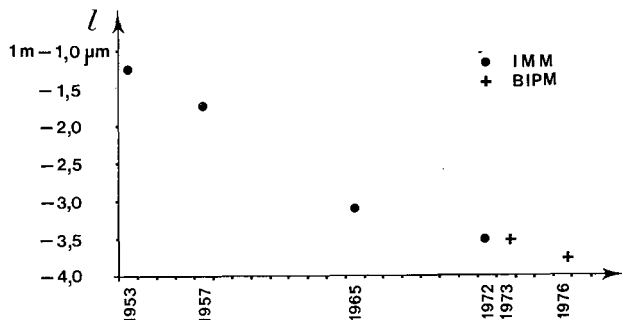


Fig. 1. — Évolution de la longueur l de la règle N° 4795.

— Règle N° 46 de 1 m en acier au nickel (Institut National de Métrologie, Bucarest) : coefficient de dilatation, équation de l'intervalle principal, étalonnage de 137 traits.

Étalons à bouts (J. Hamon)

Calibres

Nous avons étudié les calibres en acier suivants, au moyen de l'interféromètre Tsugami :

— pour le Bureau Fédéral des Poids et Mesures (Berne), neuf calibres de 5, 15, 25, 40, 50, 60, 75, 90 et 100 mm ; pour quatre d'entre eux, nous avons déterminé le coefficient de dilatation ;

— pour le Laboratoire National d'Essais (Paris), six calibres de 1, 5, 10, 20, 50 et 100 mm.

Les valeurs obtenues pour un calibre de 250 mm (Institut Métrologique Tchécoslovaque, Bratislava), mesuré d'une part dans l'interféromètre Tsugami et d'autre part au moyen du comparateur photoélectrique et interférentiel (Rapport 1976, p. 32), sont concordantes à 0,01 μm près.

Étalons à bouts de forme cylindrique

Pour la Société Moore (États-Unis d'Amérique) et avec l'accord du NBS, nous avons commencé l'étude, au moyen du comparateur photoélectrique et interférentiel, de six étalons en acier : un de longueur nominale 457,2 mm, un de 480 mm, deux de 609,9 mm, un de 812,8 mm et un de 1 219,2 mm. Il sera intéressant de comparer les résultats de ces mesures à ceux obtenus au NBS, au NPL et à la PTB où ces étalons ont été déjà étudiés.

Étalon N° 5 pour la mesure de l'accélération due à la pesanteur

Cet étalon a déjà été mesuré en mars 1975; nous avons obtenu (à 20 °C) : 827 540,64 μm .

De nouvelles mesures, effectuées dans les mêmes conditions (dans l'interféromètre de Michelson sous vide) ont donné :

$$\begin{aligned}\text{Étalon N° 5} &= 827\,540,46 \mu\text{m} \text{ (octobre 1976),} \\ &827\,540,48 \mu\text{m} \text{ (février 1977).}\end{aligned}$$

Base géodésique (G. Girard)

Deux déterminations de coefficient de dilatation ont été effectuées après traitement thermique de l'*invar géodésique* de la livraison 31 C.

Quatre déterminations de coefficient de dilatation ont été effectuées en vue de la réception d'une nouvelle coulée d'alliage; la valeur obtenue, trop peu négative, nous a conduits à refuser cet alliage en tant qu'*invar géodésique*.

Les *installations de la base géodésique* ont été totalement démontées avant le début des travaux entrepris au sous-sol de l'Observatoire (*voir* p. 22), en raison notamment de la pose de canalisations d'évacuation des eaux usées le long de la base elle-même.

Interférométrie

Lasers (J.-M. Chartier)

Au cours des précédentes années, nos efforts s'étaient portés en priorité sur des lasers asservis sur l'iode, à $\lambda = 633 \text{ nm}$. Ces lasers sont maintenant utilisés couramment pour diverses mesures. Nous poursuivons néanmoins quelques études : mise au point de lasers à fréquence décalée, sans modulation de fréquence, pour les mesures par comptage de franges (longueurs et mesure de g), identification des effets de déplacement de fréquence qui

entraînent un défaut de reproductibilité. Les comparaisons ont montré que la reproductibilité atteint 5×10^{-11} ⁽¹⁾.

Les lasers asservis sur le méthane, à $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$, sont très prometteurs du point de vue de la reproductibilité. Le BIPM ne possédait jusqu'ici qu'un laser de ce type, don du NBS, utilisé depuis 1970 pour des déterminations de longueur d'onde. Nous avons entrepris la construction de deux autres lasers du même type et d'un laser à fréquence décalée. De plus, nous étudions une méthode de comptage réversible, nécessaire pour étudier les battements à fréquence moyenne nulle. Le BIPM sera ainsi en mesure d'effectuer des comparaisons de fréquence de ces lasers; de telles comparaisons sont en projet avec le Comité des Normes d'U.R.S.S., le LPTF (Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences, Paris) et le NPL (Teddington).

Le BIPM n'étant pas équipé pour fabriquer lui-même les tubes à décharge à hélium-néon utilisés dans ces deux types de lasers, nous avons jusqu'ici utilisé des tubes commerciaux. Leur prix est élevé, leur durée de vie est limitée et le remplacement d'un tube hors d'usage s'est révélé quelquefois impossible. Nous avons essayé, avec quelque succès, de renouveler le remplissage de tubes usagés. Les opérations de mise à la pression atmosphérique, de soufflage du verre et de dégazage sont particulièrement critiques car on doit éviter toute pollution des faces internes des fenêtres. Nous avons profité de ces opérations pour introduire dans les tubes quelques grains de zéolithe, jouant le rôle de *getter*, et pour adapter sur certains tubes un robinet qui facilite les remplissages ultérieurs; cela permet en particulier d'ajuster la pression et la composition du mélange gazeux, suivant les besoins. Nous avons ainsi obtenu, pour des tubes Spectra-Physics, type 119, une puissance rayonnée maximale d'environ $400 \mu\text{W}$ à $\lambda = 633 \text{ nm}$, pour un courant d'excitation de 5 mA, avec un mélange constitué de ^{20}Ne (pression partielle $\approx 68 \text{ Pa}$) et de ^3He (pression partielle $\approx 300 \text{ Pa}$). Nous avons aussi renouvelé le mélange gazeux du laser JILA/BIPM ($\lambda = 3,39 \mu\text{m}$); suivant les conseils de R. L. Barger, nous avons adopté le mélange ^{22}Ne (33 Pa)- ^3He (240 Pa) pour lequel la courbe de gain est bien centrée sur le pic d'absorption saturée du méthane (*fig. 2*). Notons au passage que la cuve à méthane de ce laser est la cuve d'origine, remplie en 1970 au JILA (Boulder), et qu'elle ne semble pas avoir vieilli.

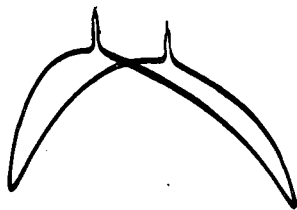


Fig. 2. — Pic d'absorption saturée du méthane.

En ordonnée, puissance rayonnée par le laser (unité arbitraire);
en abscisse, avec un léger déphasage, variation de la longueur de la cavité (tension sinusoïdale appliquée à la cale piézoélectrique).

⁽¹⁾ CHARTIER (J.-M.), HELMCKE (J.) and WALLARD (A. J.), *IEEE Trans. Inst. Measurements*, **IM25**, 1976, pp. 447-450 et *Recueil de Travaux du BIPM*, **5**, 1975-1976 (article 13).

Lasers asservis sur l'absorption de l'iode

Améliorations. — Elles ont porté sur la régulation de température de l'enceinte (mise en température plus rapide) et du point froid de la cuve à iode (meilleure répétabilité), sur les miroirs (puissance plus élevée), sur la modulation (possibilité de synchroniser la modulation de deux lasers à comparer), sur l'électronique d'asservissement (démodulation, intégration et amplification haute tension à faible dérive et faible bruit).

Les trois lasers à $^3\text{He}-^{20}\text{Ne}$ ($^{127}\text{I}_2$) construits au BIPM totalisent respectivement 10 000, 6 900 et 4 600 heures de fonctionnement; l'un des tubes à décharge a fonctionné 6 000 heures sans défaillance.

Stabilité à long terme. — Nous comparons périodiquement deux de ces lasers (BIPM2 et BIPM4); les écarts observés n'excèdent pas $\pm 3 \times 10^{-11}$ depuis près de trois ans (fig. 3).

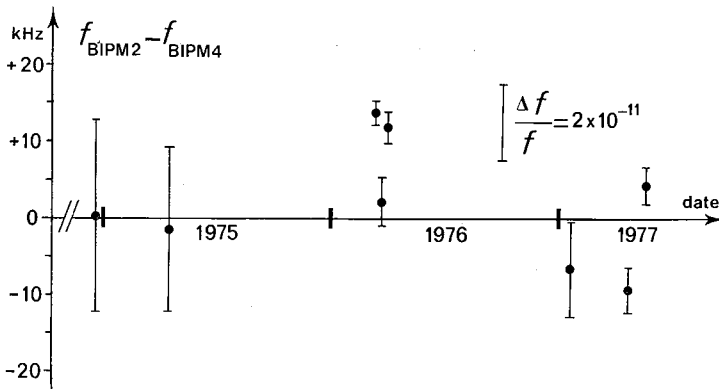


Fig. 3. — Stabilité à long terme de la différence de fréquence de deux lasers du BIPM asservis sur l'iode.

Comparaisons. — a) Le BIPM a construit un laser asservi sur l'iode pour l'International Latitude Observatory de Mizusawa (Japon) dans le cadre de l'assistance technique à cet observatoire pour la création d'une station gravimétrique. Ce laser (BIMIZU) a été comparé, au BIPM, avec BIPM2 :

mars 1976 (BIMIZU) — (BIPM2) = 17 kHz $\sigma = 5$ kHz.

Au NRLM (Tokyo), il a été comparé avec un laser analogue (NRLM2); les résultats provisoires communiqués par K. Tanaka sont :

mai 1976 (NRLM2) — (BIMIZU) = 1,3 kHz $\sigma = 25$ kHz.

L'écart-type élevé de ces dernières mesures est dû en grande partie à la technique de mesure des battements, qui sera améliorée.

b) Les trois lasers construits par R. Felder (INM, Paris) au cours de son stage (janvier 1974 — janvier 1977) ont donné :

avril 1975 (BIPM2) — (INM1) = — 1,0 kHz $\sigma = 2,4$ kHz,
 juil. 1976 (BIPM2) — (INM3) = 66,4 kHz $\sigma = 3,5$ kHz,
 mars 1977 (BIPM2) — (INM2) = 0,6 kHz $\sigma = 4,2$ kHz.

L'écart élevé observé avec INM3 semble provenir d'un mauvais réglage de la cavité.

Étalonnage de lasers asservis sur le Lamb-dip

Nous avons réétalonné quatre lasers Spectra-Physics, type 119, par battements avec un laser asservi sur l'iode (BIPM2).

— Laser N° 3734 512 (BIPM, interférométrie) :

novembre 1976	$\lambda = 632\,991\,406,15$ fm,
juin 1977	$\lambda = 632\,991\,411,87$ fm.

— Laser N° 418 (BIPM, longueurs) :

novembre 1976	$\lambda = 632\,991\,416,89$ fm,
juin 1977	$\lambda = 632\,991\,418,63$ fm.

— Laser N° 3384 561 (IMGC, gravimètre) :

19 janvier 1977	$\lambda = 632\,991\,423,8$ fm;
-----------------	---------------------------------

précédent étalonnage fait par l'IMGC à Turin :

24 novembre 1976	$\lambda = 632\,991\,422,7$ fm.
------------------	---------------------------------

— Laser N° J3345 (IMGC, gravimètre) :

19 janvier 1977	$\lambda = 632\,991\,412,3$ fm;
-----------------	---------------------------------

précédent étalonnage fait par l'IMGC à Turin :

novembre 1976	$\lambda = 632\,991\,412,0$ fm.
---------------	---------------------------------

Ces résultats confirment la cohérence des étalonnages par battements utilisant comme référence un laser asservi sur l'iode; ils confirment aussi l'accroissement de la longueur d'onde au cours du temps, de l'ordre de 1×10^{-8} par an, déjà signalé (Rapport 1973, p. 42).

Lasers asservis sur l'absorption du méthane

Deux lasers de ce type ont été construits par notre atelier (BICH4.2 et BICH4.3). Leurs principales caractéristiques sont les suivantes :

— *Cavité* : longueur 55 cm; miroirs de rayons de courbure 120 et 300 cm, de facteur de transmission 0,26 et de facteur d'absorption $< 0,002$ (Spectra-Physics); chacun des miroirs est fixé sur une céramique piézoélectrique, l'une sert à moduler la longueur de la cavité, l'autre (Eldon-Jodon, type MD 44) à en asservir la longueur moyenne.

— *Tube à décharge* : tube à cathode froide, à capillaire tronçonné de diamètre intérieur 3 mm (Eldon-Jodon, type CE 2902-3 CS); courant d'excitation continu de 2 à 14 mA; le mélange gazeux contenu dans ces tubes est malheureusement peu satisfaisant : la courbe de gain n'est pas centrée sur le pic d'absorption saturée du méthane; nous devons soit refaire le remplissage, soit utiliser l'asservissement sur la dérivée troisième.

— *Cuve à méthane* : longueur 20 cm; fenêtres soudées; une cuve a été aimablement remplie de méthane par P. Cérez du Laboratoire de l'Horloge

Atomique (LHA), Orsay, sous une pression de 2,7 Pa (20 μmHg), l'autre, munie d'un robinet, permettra d'étudier l'effet de la pression de méthane.

— *Récepteur*: nous soupçonnons les récepteurs de très petite surface et de sensibilité très peu uniforme (Philco, type 4530) d'introduire des effets géométriques; un récepteur de « grande » surface (Judson, type J12, surface: 0,8 mm²), mais huit fois moins sensible, devrait permettre d'étudier ces effets et peut-être de s'en affranchir.

— *Électronique d'asservissement*: identique à celle des lasers asservis sur l'iode, elle permet d'utiliser soit la dérivée première, soit la dérivée troisième.

Comparaison de longueurs d'onde (J. Hamon)

Les longueurs d'onde des quatre radiations du mercure 198 utilisées dans l'interféromètre Tsugami ont été comparées à la longueur d'onde de la radiation étalon primaire à l'aide de l'interféromètre de Michelson sous vide réglé à une différence de marche de ± 200 mm.

Le tableau suivant indique les valeurs de λ obtenues en 1976 et les différences $\Delta\lambda$ entre ces valeurs et celles que nous avons obtenues en 1971 (Rapport 1972, p. 39).

$\lambda(^{198}\text{Hg})$	$\Delta\lambda$
579 226 858 fm	+ 8 fm
577 119 862	+ 6
546 227 078	— 4
435 956 253	+ 4

La différence relative est, en moyenne, $+ 0,6 \times 10^{-8}$.

Divers

— Ajustage de sept trièdres optiques destinés à des appareils de mesure de g , pour faire coïncider le centre optique et le centre de gravité à 30 μm près.

— Réglage de l'interféromètre du manobaromètre interférentiel.

Masses (G. Girard)

Kilogrammes prototypes

Le Kilogramme prototype N° 2 (Roumanie) a été comparé avant et après un nettoyage au benzène et à l'alcool purs suivi d'un lavage sous un jet de vapeur d'eau bidistillée, à nos Kilogrammes prototypes d'usage courant N° 9 et N° 31.

Le nettoyage-lavage a provoqué une diminution apparente de masse de 0,035 mg.

Le résultat trouvé, après nettoyage-lavage, est:

N° 2 (Roumanie) 1 kg — 1,044 mg (novembre 1976).

La valeur précédemment admise (1946) était de 1 kg — 0,992 mg.

Parmi les quatre cylindres en platine iridié JM13 à JM16 (Rapport 1976, p. 46) destinés à constituer des Kilogrammes étalons, l'un (JM15) a été revendu à l'Institut National de Métrologie, Paris.

La masse volumique des trois autres cylindres a été déterminée par des pesées hydrostatiques effectuées au voisinage de 4 °C. L'eau du robinet du BIPM, bidistillée, a été utilisée comme étalon; pour sa masse volumique à 4 °C, on a admis 999,972 kg/m³ et pour sa dilatation thermique, celle qui est donnée par la table de Chappuis.

Les résultats suivants ont été obtenus :

Cylindre	Masse volumique à 0 °C
JM13	21 555,98 kg/m ³
JM14	21 550,01
JM16	21 544,62

Conservation des étalons de masse

Dans de nombreux laboratoires, de même qu'au BIPM, les étalons de masse et en particulier ceux de 1 kg sont conservés sur des supports appropriés, sous une ou deux cloches en verre qui reposent sur une plaque métallique ou en verre rodé.

A l'occasion d'une nouvelle détermination de la masse de plusieurs prototypes nationaux du kilogramme, nous avons systématiquement déterminé leur masse avant et après nettoyage et lavage. Nous avons pu en conclure que la masse de ces étalons avait augmenté du fait de la pollution de 2 à 5 microgrammes par année, un peu davantage pour ceux dont la surface était rayée (7 µg/a). La même constatation a été faite sur les étalons d'usage du BIPM et même sur deux témoins du Prototype international.

Cette pollution est due à une circulation de l'air entre l'intérieur et l'extérieur des cloches produite par les variations de pression atmosphérique.

Dans les trois dernières années, une étude a été faite au BIPM pour savoir si des nettoyages et des lavages répétés sur des étalons en platine iridié pouvaient modifier leur masse: aucune variation n'a été constatée (Rapport 1976, p. 40).

Au lieu de soumettre ces étalons à des opérations de nettoyage et de lavage trop fréquentes, il serait certainement préférable de les conserver dans de bien meilleures conditions, afin qu'ils se polluent moins.

A cet effet, un étui spécial a été construit (*fig. 4*) dans lequel l'air intérieur communique avec l'air extérieur ambiant à travers un filtre à pores très fins (0,8 µm). Le capot, qui repose sur un joint torique, est maintenu au contact de celui-ci par une bague fileté et moletée. L'étalon de masse placé à l'intérieur n'est donc pas situé dans une atmosphère confinée.

Afin de nous rendre compte de l'efficacité de ce nouveau type d'étui, nous avons disposé sur une étagère, dans un garage ouvert, d'une part un support classique à double cloche en verre contenant un étalon (A4) en acier inoxydable et d'autre part l'étui spécial contenant un autre étalon (A3) de même nature que le précédent.

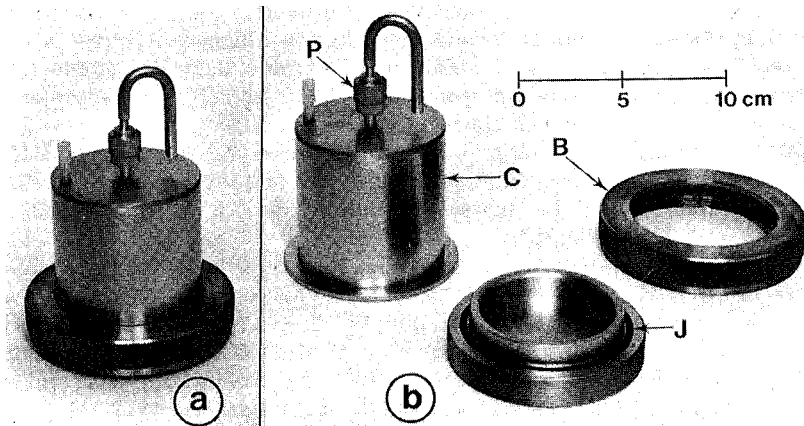


Fig. 4. — Étui expérimental pour la conservation des étalons de masse.

a) Étui fermé; b) Étui ouvert.

C, capot; P, porte-filtre; J, joint torique; B, bague filetée et moletée.

Ces deux étalons, dont le poli était très bon, ont été comparés en avril (avant le début de l'expérience) et en novembre 1976. Les différences de leurs masses sont les suivantes :

$$(A4) - (A3) = \begin{cases} + 22 \mu\text{g} \text{ en avril 1976,} \\ + 80 \mu\text{g} \text{ en novembre 1976.} \end{cases}$$

La pollution de A4 est très nette et d'ailleurs visible : sa surface est devenue plus terne que celle de A3.

Cet étui a donc montré son efficacité, dans des conditions ambiantes beaucoup plus mauvaises que celles d'un laboratoire des masses.

L'expérience se poursuit. On a modifié la communication entre l'intérieur de l'étui et l'atmosphère. L'air extérieur doit traverser un premier filtre (pores de $0,8 \mu\text{m}$), puis un second à pores plus fins ($0,1 \mu\text{m}$) séparé du premier par un long tube (diamètre intérieur 4 mm, longueur 1 m) enroulé autour du capot.

Études courantes

— Détermination de la masse d'un étalon de 1 kg N° 8 en bronze blanc et d'un étalon de 1 g en laiton doré (Institut National de Métrologie de Roumanie). Il peut être intéressant de noter l'évolution de la masse de l'étalon en bronze blanc (composition : cuivre 0,548, nickel 0,431, cobalt 0,014) depuis la première mesure effectuée au BIPM.

N° 8	1 kg	+ 0,32 mg	en 1904
		— 3,69	1962
		— 4,41	1977

On constate une diminution moyenne de 0,065 mg par année. Pour un étalon du BIPM (N° 5), constitué du même alliage, on avait constaté une variation de — 0,083 mg entre 1898 et 1908.

— L'Institut National de Métrologie (Paris) nous a confié deux étalons (INM2 et INM4), de masse voisine de 1 kg, en alliage « Alacrite XSH » (composition approximative: cobalt 0,55, chrome 0,20, tungstène 0,15, nickel 0,10; masse volumique voisine de 9 200 kg/m³). Nous étudierons l'évolution de leur masse en fonction du temps.

— Étalonnage de la série d'étalons de masse N° 93 pour le BIPM (500 g à 1 g en acier inoxydable « Nicral D » et 500 mg à 1 mg en platine) et détermination de la masse volumique de la pièce de 500 g ($\rho(0\text{ °C}) = 7\,839,14\text{ kg/m}^3$).

— Étalonnage, après achat par le BIPM, de dix séries d'étalons de masse de 100, 50, 20, 10 mg en alliage « Vachromium » (composition: nickel 0,8, chrome 0,2; masse volumique: 8 344,7 kg/m³ à 20 °C). Ces étalons ont été construits par le Bureau Central des Mesures Nucléaires (BCMNI), Geel, Belgique, et les pièces de 100, 50 et 20 mg sont celles qui ont participé à la comparaison internationale de masses en 1972 (Rapports 1972, p. 43 et 67, et 1973, p. 46 et 71; *CCEMRI*, Section II, 1972, p. R 34).

— Détermination de la masse d'un étalon de 1 kg N° FN1 en acier inoxydable (Nigéria).

— Détermination de la masse volumique d'un échantillon d'eau du robinet du BIPM pour l'étalonnage d'un densimètre à boucle vibrante utilisé à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris) par A. Poisson dans ses travaux sur l'eau de mer.

Divers

— Achat d'une chaîne de titrage « Radiometer » pour mesurer la teneur de l'eau en oxygène dissous. Elle nous servira pour l'étude de l'influence des gaz dissous sur la masse volumique de l'eau.

— Achat d'un hygromètre à point de rosée type 440 fabriqué par « EG and G », États-Unis d'Amérique. Avant livraison, cet hygromètre a été étalonné au NBS en différents points.

— A l'occasion de la réunion concernant les masses (novembre 1976), P. E. Pontius (NBS) nous a fait don de la part de son laboratoire de deux cristaux de silicium de forme cylindrique; leur masse volumique avait été déterminée par rapport à des sphères en acier inoxydable dont la masse volumique avait elle-même été déterminée de façon absolue. Ces cristaux nous serviront, après l'étude de l'influence des gaz dissous, à déterminer la masse volumique de l'eau à une ou plusieurs températures.

Le BIPM est une nouvelle fois reconnaissant pour l'aide que le NBS lui apporte dans le domaine des masses.

Réunion internationale concernant les masses

La réunion de quelques spécialistes intéressés par les questions relatives aux masses (Rapport 1976, p. 45) s'est tenue au BIPM les 23 et 24 novembre 1976.

En conclusion de ses travaux, trois groupes de travail ont été constitués. Leurs objectifs sont les suivants :

Groupe de travail 1 : établir une formule pour le calcul de la correction de poussée de l'air; après adoption, cette formule pourrait être appliquée internationalement;

Groupe de travail 2 : rassembler les renseignements sur les méthodes de mesure directe de la poussée de l'air ;

Groupe de travail 3 : étudier la conservation des étalons de masse.

Le rapport sur cette réunion (ce volume, p. A 1) a été envoyé aux participants, aux membres du CIPM et à quelques laboratoires.

Échelles de temps (J. Azoubib)

Temps Atomique International (TAI)

Jusqu'au 1^{er} janvier 1977, en se fondant sur les données des étalons primaires du NBS, du NRC et de la PTB, on estimait la durée de l'intervalle unitaire du TAI trop courte de 10×10^{-13} s. Le calcul du TAI se faisait cependant sans tenir compte de ce défaut d'exactitude.

Le 1^{er} janvier 1977, la durée de l'intervalle unitaire du TAI a été allongée de 10×10^{-13} s conformément à la Résolution 2 des Commissions 4 et 31 de l'Union Astronomique Internationale (1976). Actuellement, le TAI est une échelle pilotée, c'est-à-dire que la durée de son intervalle unitaire suit les réalisations de la seconde du SI. Le calcul du TAI s'effectue donc en trois étapes :

- calcul d'une échelle libre,
- estimation de la durée de son intervalle unitaire,
- application de corrections pour obtenir l'échelle pilotée.

L'échelle libre

L'échelle libre diffère du TAI à partir du 1^{er} janvier 1977. La méthode de calcul décrite dans le Rapport annuel du Bureau International de l'Heure (BIH) pour 1973 ayant donné jusqu'à présent entière satisfaction, elle est toujours en vigueur. L'échelle est établie à partir des données individuelles des horloges. Ces données sont traitées par le programme ALGOS, dont l'algorithme assure la continuité en phase et en fréquence de l'échelle libre.

Il y a actuellement une centaine d'horloges participantes, localisées dans 22 laboratoires ; ce sont toutes des horloges à césium. De 1976 à 1977, on note une augmentation du poids moyen attribué aux horloges commerciales, ce qui indique une amélioration de leur stabilité à long terme. Deux étalons à césium de laboratoire, l'étalon NBS-4 du NBS et l'étalon NRC CsV du NRC, continuent à fonctionner en horloges. Malgré la Recommandation S 5 (1974) du CCDS et les demandes pressantes du BIH, aucune donnée d'horloge autre que celles d'horloges à césium n'a été fournie au BIH.

Les réceptions de signaux du LORAN-C et de la télévision restent les méthodes courantes pour comparer les horloges. Les incertitudes de ces méthodes détériorent de façon appréciable les données des horloges telles qu'elles parviennent au BIH. Des expériences de liaison par satellite ont été effectuées par différents pays, en particulier au moyen du satellite NTS-1 entre les États-Unis d'Amérique, l'Australie et la Grande-Bretagne, au moyen du satellite ATS-1 entre les États-Unis d'Amérique et le Japon et au moyen du satellite Symphonie entre la France et la Rép.

Féd. d'Allemagne. Toutes ces expériences ont donné des résultats remarquables qui ont montré la possibilité d'effectuer des comparaisons d'horloges éloignées avec une précision de 10 ns, alors que la précision du LORAN-C est de quelques centaines de nanosecondes. La réalisation permanente de telles liaisons permettrait d'améliorer le TAI et d'introduire des horloges d'Australie et du Japon dans le réseau du BIH.

Estimation de la durée de l'intervalle unitaire et pilotage

Cette estimation est effectuée à partir de toutes les données des étalons primaires de fréquence à l'aide d'un filtre établi par le BIH. Le calcul de ce filtre, qui tient compte des corrélations possibles entre mesures successives faites avec le même étalon primaire, a été expliqué en détail ⁽²⁾. Le pilotage du TAI a été soigneusement étudié. Il ressort de cette étude qu'il est possible d'assurer l'exactitude de cette échelle tout en améliorant sa stabilité à long terme.

Suivant la Recommandation S 1 (1977) du CCDS, le pilotage du TAI est devenu effectif à partir d'avril 1977. La méthode choisie consiste à effectuer des ajustements de fréquence par sauts de $0,2 \times 10^{-13}$ en valeur relative lorsque cela se révèle nécessaire, c'est-à-dire lorsque la valeur absolue de la différence entre la durée de l'intervalle unitaire du TAI et la seconde du SI au niveau de la mer est supérieure ou égale à $0,2 \times 10^{-13}$ s.

Gravimétrie (A. Sakuma)

Station gravimétrique de Mizusawa

Les travaux pour l'établissement de la station gravimétrique absolue de l'International Latitude Observatory (ILO), Mizusawa, Japon, progressent de façon très satisfaisante. Les Sociétés Nikon (optique et mécanique) et Oki (électronique) ont commencé vers le début de 1977 à mettre en place les appareils construits selon nos indications, cela avec six mois d'avance sur les prévisions. L'interféromètre de Michelson, le sismomètre interférentiel et la table anti-vibratoire destinés à cette station ont été construits au BIPM et transportés par avion à Mizusawa. Nous avons constaté, au moyen du sismomètre interférentiel, que l'amplitude des microséismes à l'ILO est très faible : 1/10 environ de celle que l'on observe au BIPM. La perturbation du champ magnétique terrestre, également très faible (< 10 nT), est environ 1/50 de celle que l'on mesure au BIPM.

La catapulte pour le lancement du trièdre fonctionne correctement, avec une bonne reproductibilité (mai 1977). La mise au point de l'appareil pourrait être terminée fin août 1977.

Gravimètre absolu transportable

Au moyen de ce gravimètre, construit en étroite collaboration par le BIPM et l'IMGC, treize nouvelles stations gravimétriques absolues ont été

⁽²⁾ AZOUBIB (J.), GRANVEAUD (M.) and GUINOT (B.), Estimation of the scale unit duration of time scales, *Metrologia*, **13**, 1977, pp. 87-93.

établies depuis novembre 1975 : Catania, Napoli, Roma, Pino, Torino, Bruxelles, Teddington, Copenhague, Göteborg, Gärlé, Vaasa, Sodankylä et Hammerfest. Les valeurs de g en ces stations constituent, avec celle du BIPM, une échelle de pas moyen $2 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$ pour une différence totale de $26 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$.

La mesure absolue de Bruxelles semble être la meilleure du fait que cette station, située dans l'Observatoire Royal de Belgique (Uccle) était le seul endroit (hormis Sèvres) pour lequel la marée gravimétrique et le gradient vertical de g étaient suffisamment connus. On a trouvé :

$$g_{\text{Bruxelles A, abs}} = (9,811\ 172\ 98 \pm 0,000\ 000\ 08) \text{ m/s}^2.$$

Cette valeur est en bon accord avec la valeur de g au même lieu dans le Réseau Gravimétrique International Unifié 1971 :

$$g_{\text{Bruxelles A, IGSN-71}} = (9,811\ 173\ 20 \pm 0,000\ 000\ 32) \text{ m/s}^2.$$

La différence

$$g_{\text{Bruxelles A}} - g_{\text{Sèvres A}} = (1,912\ 90 \pm 0,000\ 12) \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$$

est actuellement la meilleure échelle absolue pour l'étalonnage de gravimètres à ressort.

La dernière liaison gravimétrique entre ces deux stations, faite en 1975 (Sato *et al.*) avec deux gravimètres à ressort (La Coste Romberg), a montré que l'étalonnage de ces gravimètres était erroné de 7×10^{-4} , soit environ dix fois l'incertitude indiquée par le fournisseur.

Thermométrie (J. Bonhoure)

Dans le Rapport de 1976 (p. 55), nous indiquions notre intention de poursuivre l'étude par pyrométrie infrarouge des températures thermodynamiques dans l'intervalle 419-630 °C. On a apporté quelques améliorations aux installations de mesure et on a acquis la plus grande partie des nouveaux matériels nécessaires, mais l'étude prévue en 1977 a dû être différée par suite des importants travaux de bâtiment entrepris dans le sous-sol de l'Observatoire (*voir* p. 21). On s'est donc presque exclusivement consacré au développement des basses températures.

Échelle Internationale Pratique de Température

Point triple du méthane. — Le méthane est intéressant pour plusieurs raisons. Tout d'abord la température de son point triple est très proche, à moins de 0,5 K, de celle du point d'ébullition de l'oxygène; c'est pourquoi le remplacement de ce dernier point fixe par le point triple du méthane serait encore plus facile que par le point triple de l'argon. Ensuite, le méthane présente un point de transition voisin de 20 K qui pourrait peut-être se substituer dans le futur au point d'ébullition de l'hydrogène. Si l'on parvenait à définir l'EIPT à partir des points fixes d'un nombre minimal de corps purs judicieusement choisis, la « pureté » de l'EIPT serait améliorée.

On a utilisé le cryostat décrit dans le Rapport de 1976 (p. 51) à propos de la réalisation du point triple de l'argon. Ce cryostat permet d'obtenir un équilibre thermique pratiquement adiabatique au niveau de la chambre de mesure contenant le méthane; le thermomètre du type capsule, placé dans le puits en doigt de gant ménagé dans la chambre de mesure, indique une température qui est le reflet fidèle de celle du méthane.

La substitution du méthane à l'argon dans l'ensemble des installations de mesure a nécessité un très grand nombre de mises sous vide et de rinçages alternés avant de parvenir à une charge de méthane pur dans la chambre; cela montre combien il est difficile de purger convenablement ce type d'installation.

Entre avril 1976 et mai 1977, on a réalisé quinze paliers de température avec du méthane de pureté nominale 99,995 % (N45) ou 99,999 5 % (N55). Pour chaque palier, on a examiné comment évoluait la température du point triple en fonction de $1/F$, F étant la fraction liquide de la masse totale de méthane; on a toujours considéré les résultats pour $F = 1$ (point de liquidus) et pour un courant de mesure nul dans le thermomètre.

Les paliers 1, 2 et 3 ont été obtenus avec du méthane N45 mis en bouteille depuis peu de temps, les paliers 4 à 10 avec la même bouteille de gaz mais plusieurs mois plus tard. Les paliers 11 et 12, réalisés avec du méthane N55, présentaient une forte pente, signe caractéristique d'un gaz accidentellement pollué; les paliers 13, 14 et 15, toujours obtenus avec du méthane N55 mais d'une autre bouteille, n'avaient pas ce défaut.

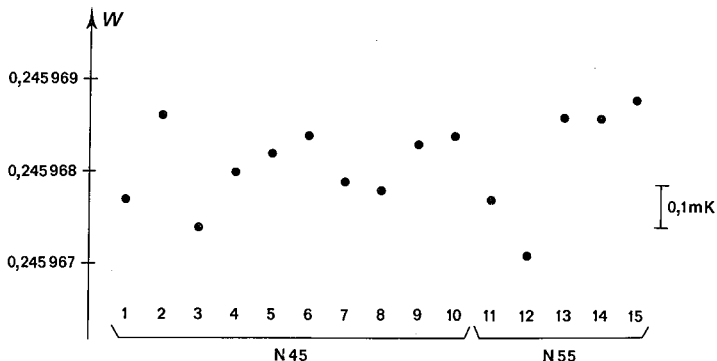


Fig. 5. — Point triple du méthane.

Valeur de la résistance réduite W du thermomètre pour les différents paliers réalisés d'avril 1976 à mai 1977.

La figure 5 montre la dispersion des résultats. On notera d'abord que le séjour prolongé du méthane dans un récipient en acier ne semble pas altérer sa pureté. On remarquera ensuite la valeur un peu faible des paliers 11 et 12 qui correspondent au gaz pollué, et le niveau élevé des paliers 13, 14 et 15 obtenus avec le gaz le plus pur. Cependant, nous n'avons pas estimé les écarts observés suffisamment significatifs pour éliminer les paliers 11 et 12 ni pour affecter les autres paliers de poids inégaux. La valeur moyenne de la résistance réduite W du thermomètre utilisé lors de ces mesures est

$$W = (245\,968,1 \pm 0,5) \times 10^{-6},$$

ce qui conduit à attribuer à la température T_{68} du point triple du méthane la valeur

$$T_{68} = 90,686 \text{ K} \pm 0,2 \text{ mK.}$$

L'incertitude de 0,2 mK (écart-type de la moyenne) tient compte aussi de la dispersion des résultats au point triple de l'argon qui est un peu supérieure à la dispersion au point triple du méthane.

Le point triple du méthane est un point fixe au moins aussi bon, sinon meilleur, que le point triple de l'argon.

Étalonnage des thermomètres du type capsule. — Le résultat ci-dessus implique que le thermomètre soit étalonné. L'étalonnage au point triple de l'argon ne pose évidemment aucun problème puisque l'on dispose du cryostat nécessaire. Mais il faut aussi déterminer le coefficient α du thermomètre, soit au point d'ébullition de l'eau, soit au point de congélation de l'étain. Or, d'une part nous estimons que 232 °C est une température trop élevée pour ce type de thermomètre, d'autre part nous n'avons plus de chaudière à vapeur d'eau à atmosphère contrôlée en bon état de fonctionnement. Nous avons donc procédé à deux séries d'étalonnage distinctes : d'abord par mesure directe dans une chaudière ouverte à l'atmosphère en tenant compte de la pression atmosphérique, ensuite par comparaison à deux thermomètres du type à tige (eux-mêmes étalonnés au point de congélation de l'étain) dans un four présentant une très bonne uniformité de température au voisinage de 100 °C.

L'ensemble de ces mesures a permis de déterminer le coefficient α avec l'exactitude nécessaire, d'autant plus facilement que l'intervalle de température entre le point triple du méthane et le point triple de l'argon est faible (inférieur à 7 K).

Point triple de l'eau. — Le contrôle des thermomètres à résistance de platine dans des cellules à point triple de l'eau est devenu extrêmement fréquent ; aussi dispose-t-on de nombreux résultats. Deux cellules fabriquées à l'IMGC, Italie (N° 10 et N° 12) et gracieusement cédées au BIPM ont été utilisées simultanément avec des cellules commerciales de fabrication américaine (N° 758, N° 759 et N° 760). A titre d'exemple, l'écart observé entre deux cellules d'origines différentes est donné ci-dessous en millikelvins. On a indiqué entre parenthèses le type de pont employé et le nombre de valeurs utilisées pour le calcul de la moyenne.

(N° 758) — (N° 10)	(N° 758) — (N° 12)
+ 0,01 ± 0,03 (ASL, 20)	+ 0,03 ± 0,02 (ASL, 26)
+ 0,04 ± 0,02 (Guildline, 3)	+ 0,04 ± 0,02 (Guildline, 7)

On peut considérer l'accord comme tout à fait satisfaisant.

On souhaite à nouveau que les laboratoires qui fabriquent des cellules à point triple de l'eau nous en cédent quelques-unes ou tout au moins participent à des échanges de façon à mieux connaître la dispersion des diverses productions.

Cellules scellées pour thermomètres du type capsule. — Dans le Rapport de 1976 (p. 53), nous indiquions l'intérêt que présentent les cellules scellées, mais aussi la difficulté de leur réalisation. La construction d'une cellule à éléments cylindriques en cuivre s'est révélée très délicate ; elle a été

provisoirement abandonnée. En revanche, on a construit quatre cellules en acier inoxydable suivant une technique mise au point dans d'autres laboratoires et largement éprouvée. Deux de ces cellules ont été emplies d'argon et les deux autres de méthane. Les essais effectués en installant la cellule à la place de la chambre de mesure au centre du cryostat, et en utilisant le même système de régulation pour obtenir l'adiabaticisme, sont satisfaisants. Avec l'argon, on a déjà observé des paliers de longue durée dont la valeur en température est en bon accord avec les résultats obtenus dans la chambre de mesure; avec le méthane, les essais sont en cours. Cependant, on persiste à croire que l'emploi d'une paroi en cuivre pour améliorer le contact thermique entre le thermomètre et le corps pur serait souhaitable; l'étude d'une telle cellule sera reprise ultérieurement.

Thermocouples. — Périodiquement, le BIPM est amené à construire des thermocouples, en général pour ses propres besoins; ce sont soit des thermocouples étalons platine/platine rhodié, soit des thermocouples cuivre/constantan ou chromel/constantan. Jusqu'à maintenant, la soudure entre métaux ou alliages différents était obtenue par décharge électrique; si la liaison réalisée était thermiquement satisfaisante, sa résistance mécanique était faible. Depuis peu, on procède par soudure sous argon, même pour les liaisons cuivre/platine et cuivre/platine rhodié, des fils de raccordement aux appareils de mesure; la résistance mécanique s'en trouve considérablement améliorée.

Études courantes

Le BIPM a étalonné vingt thermomètres à résistance de platine (de types capsule ou à tige) et cinq thermocouples platine/platine rhodié sur la totalité ou seulement sur une partie de leur domaine propre de température. Ces instruments appartiennent au Van Swinden Laboratorium (Pays-Bas), à l'Institut National de Métrologie (Roumanie) et au Bureau Fédéral des Poids et Mesures (Suisse), ainsi qu'au BIPM qui en fait usage dans ses sections de thermométrie, manométrie, masses et électricité. De plus, on a contrôlé la résistance à 0 °C des thermomètres à résistance de platine que l'U.R.S.S. a cédés au BIPM en septembre 1976.

On a aussi déterminé la position du zéro d'un thermomètre à mercure du VNIIMS (U.R.S.S.) pour le manobaromètre interférentiel installé à Moscou.

Manométrie (J. Bonhoure)

Manobaromètre interférentiel

Le manobaromètre interférentiel prototype a été installé au BIPM en 1966 (Rapport 1966, p. 49). Sa mise au point progressive a permis d'en voir les défauts et d'apporter les améliorations nécessaires aux appareils similaires installés dans d'autres laboratoires; mais le prototype n'avait jamais été modifié et sa remise en bon état de fonctionnement devenait indispensable.

L'appareil du BIPM a donc été complètement démonté par son constructeur (Établissements Jaeger). Les chambres manométriques ont été nettoyées et remplies de mercure purifié; la suspension antivibratoire a été complétée par un dispositif à fils, de façon à mieux filtrer les composantes horizontales des vibrations; le projecteur d'éclairage de l'interféromètre a été réétudié pour rendre son réglage plus aisé; les pièces optiques ont été nettoyées et réaluminées, l'interféromètre entièrement réglé. Enfin, l'habillage de l'appareil a été modifié pour faciliter l'accès aux différents éléments.

On a aussi examiné si le remplacement de l'azote par de l'argon comme atmosphère artificielle au-dessus du mercure présenterait un avantage. Ce n'est pas le cas, puisque la forme du train de franges observé et la valeur de la correction d'indice appliquée sont très peu différentes d'un gaz à l'autre.

Études courantes

La jauge à spirale de quartz (Texas Instruments) utilisée à la Section des masses a été victime d'une fausse manœuvre et a dû être renvoyée à son constructeur en septembre 1976 pour réparation. Après son retour (mars 1977), elle a été comparée en avril et juillet 1977 au baromètre Fuess de la même Section; elle sera étalonnée par rapport au manobaromètre interférentiel dès que ce dernier sera à nouveau en service.

Électricité (G. Leclerc, T. Witt)

Comparaison de représentations nationales de l'ohm

Rattachement de Ω_{ASMW} à $\Omega_{69\text{-BI}}$. — Au cours de l'année 1976, l'ASMW (Rép. Dém. Allemande) a fait parvenir au BIPM trois étalons de 1Ω et deux étalons de $10^4 \Omega$ de premier ordre dans le but de comparer Ω_{ASMW} à $\Omega_{69\text{-BI}}$. On a obtenu :

$$\Omega_{\text{ASMW}} = \Omega_{69\text{-BI}} + 1,67 \mu\Omega \quad \text{en juillet 1976.}$$

Les étalons de $10^4 \Omega$ conduisent à la relation $\Omega_{\text{ASMW}} = \Omega_{69\text{-BI}} + 1,85 \mu\Omega$.

Comparaison restreinte d'étalons nationaux de résistance. — Pour répondre au souhait exprimé par quelques laboratoires nationaux, le BIPM a organisé une comparaison d'étalons de résistance de 1Ω à laquelle ont participé le NPRL (Afrique du Sud), le NRC (Canada), le LCIE (France), l'IEN (Italie), l'ETL (Japon) et le VSL (Pays-Bas). Cette comparaison qui a été effectuée du 18 octobre au 17 décembre 1976, à la température de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, a conduit aux résultats suivants :

$$\left. \begin{array}{l} \Omega_{\text{NPRL}} = \Omega_{69\text{-BI}} + 0,29 \mu\Omega \\ \Omega_{\text{NRC}} = \quad \quad - 1,16 \\ \Omega_{\text{LCIE}} = \quad \quad + 0,57 \\ \Omega_{\text{ETL}} = \quad \quad - 0,59 \end{array} \right\} \text{ au 17 novembre 1976.}$$

Un bref rapport sur cette comparaison sera publié lorsque tous les résultats seront connus.

Comparaison de Ω_{69-BI} à Ω_{NML} . — A l'occasion des comparaisons internationales périodiques, le BIPM profitait de la participation des étalons du NML (Australie), dont la valeur est déterminée depuis 1964 en fonction d'une fréquence et d'une capacité calculée, pour apprécier l'exactitude et l'évolution de la représentation de l'ohm qu'il conserve. L'organisation de la 14^e comparaison internationale ayant été ajournée, le BIPM a proposé au NML de comparer directement Ω_{69-BI} à Ω_{NML} , en échangeant simultanément des étalons de 1 Ω . Quatre étalons australiens ont ainsi été mesurés par le BIPM entre le 5 et le 31 mai 1977 tandis que quatre étalons du BIPM l'ont été par le NML entre la fin d'avril et le début de juin. Les mesures des étalons voyageurs après retour au NML et au BIPM se poursuivent actuellement.

Conservation de l'unité de force électromotrice

Effet Josephson. — Depuis le 1^{er} janvier 1976, nous appliquons la Recommandation E 2 (1975) du CCE (approuvée par le CIPM à sa 64^e session, 1975) pour conserver par l'effet Josephson notre référence de force électromotrice en admettant pour la fréquence qui correspond à 1 V_{76-BI} la valeur 483 594,0 GHz. Depuis cette même date, nous avons effectué 31 séries de mesures de l'effet Josephson, dont 13 depuis octobre 1976.

Au moyen d'un comparateur de tensions, nous comparons la différence de potentiel de 10 mV environ produite aux bornes de deux jonctions Josephson connectées en série à la force électromotrice (f.é.m.) d'une pile étalon non saturée de notre groupe 6BINS conservé dans une enceinte thermorégulée commerciale. Nous employons des piles non saturées en raison de leur faible coefficient de température ($\approx 1 \mu\text{V/K}$ à 30 °C), ce qui élimine les effets des variations de température (5 mK environ) de cette enceinte. Avant et après chaque série de mesure de l'effet Josephson (effectuée à l'intérieur de la cage de Faraday), on compare la f.é.m. des piles non saturées à celle d'un groupe de quatre piles saturées (4BIPM2), conservé dans une enceinte commerciale placée à l'extérieur de la cage.

Actuellement, on fait le rattachement à V_{76-BI} des f.é.m. des piles étalons envoyées au BIPM par l'intermédiaire du groupe 4BIPM2.

Les graphiques de la figure 6 permettent d'apprécier la précision des déterminations par l'effet Josephson de la f.é.m. des piles du groupe 6BINS. La f.é.m. d'une pile étalon non saturée dérive rapidement en fonction du temps (de -70 nV/d environ, soit $-25 \mu\text{V/a}$). Nous avons trouvé que cette dérive est assez linéaire et qu'il est possible de prédire sa valeur à environ 20 nV près (écart-type). On remarque une discontinuité de la valeur de J4 en novembre 1976 alors que rien de semblable n'apparaît pour J5. Cela indique que les piles non saturées, comme on l'a déjà remarqué pour les piles saturées, subissent des variations imprévisibles de f.é.m.

Les différences de f.é.m. entre les piles du groupe 6BINS et celles du groupe 4BIPM2 sont de 1 mV environ. On doit donc disposer d'une grande précision pour la comparaison de ces piles, si l'on veut conserver la précision de l'effet Josephson dans le rattachement aux piles saturées. A l'heure actuelle, ce rattachement s'effectue avec une précision de 35 nV environ, limitée par la précision du potentiomètre de comparaison, la stabilité de la température de l'enceinte des piles saturées, les effets des forces thermo-

électromotrices, les résistances de fuite et éventuellement la résolution des galvanomètres.

Nous nous efforçons de réduire ces limitations.

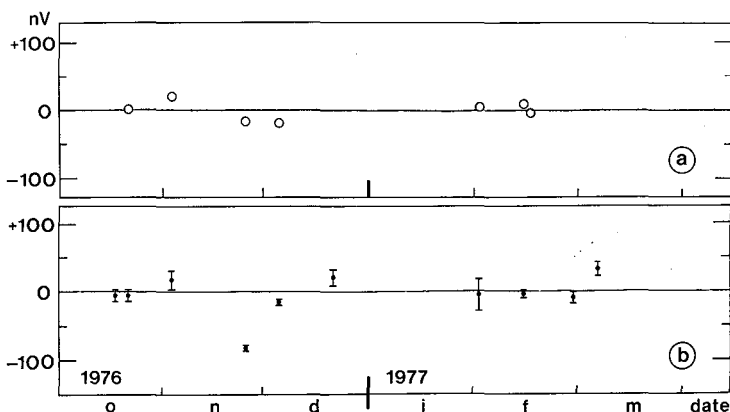


Fig. 6. — Comportement de deux piles étalons non saturées J5 (graphique a) et J4 (graphique b) du groupe 6BINS pour la période d'octobre 1976 à mars 1977.

Les graphiques donnent les écarts entre les f.é.m. déterminées directement au moyen de l'effet Josephson et les valeurs calculées en admettant une dérive linéaire. Pour le graphique b, les barres d'erreur représentent les écarts-types de la moyenne pour chaque série.

Construction d'enceintes thermorégulées pour les piles étalons. — Nous disposons de deux enceintes thermorégulées dont la stabilité de température est meilleure que celle obtenue avec les enceintes commerciales. La première, du type NBS, construite dans ce laboratoire en 1976 par T. Witt, présente des variations de température de quelques dizaines de microkelvins à court terme mais dérive linéairement de $10 \mu\text{K}$ par jour environ. Les études sur cette enceinte sont retardées par le grand délai nécessaire à la réparation du pont qui est utilisé pour mesurer la résistance de la sonde thermométrique en platine placée dans l'enceinte. La construction d'une deuxième enceinte du même type est en cours.

L'enceinte BIRD, conçue, construite et mise au point au BIPM de juillet 1975 à décembre 1976, est prévue pour contenir six piles étalons saturées. De janvier à début avril 1977, sa température (qui est déterminée par un pont interne) s'est abaissée de $0,3 \text{ mK}$, les variations d'un jour à l'autre restant inférieures à $30 \mu\text{K}$.

Pendant cette période, on a suivi l'évolution des piles étalons directement par l'effet Josephson et aussi par rapport à d'autres piles étalons, et on a constaté que les f.é.m. ont subi des changements imprévisibles. Par exemple, une pile a changé de $0,8 \mu\text{V}$ en deux semaines.

Vers la fin de mai 1977, nous avons remplacé les six piles de cette enceinte par six piles d'une autre fabrication. Nous avons, en même temps, modifié légèrement le circuit de régulation de la température. A partir de juillet, nous avons étudié le comportement de ces piles en les comparant entre elles et avec un groupe de piles externes. Nous avons observé une évolution normale, sans changements imprévisibles. Au début de septembre,

nous estimons à $-2,5 \mu\text{V/a}$ la dérive de ce groupe. La stabilité de la température est sensiblement la même que pour la période de janvier à avril.

Potentiomètre pour la comparaison des piles étalons. — Pour comparer les piles non saturées (étalonnées directement au moyen de l'effet Josephson) aux piles saturées qui sont placées dans les enceintes thermorégulées actuellement en cours d'étude et qui serviront à conserver $V_{76\text{-BI}}$, nous avons acheté un potentiomètre (Julie Research Laboratories, JRL, modèle PVP 1001).

Après livraison de ce potentiomètre (novembre 1976), des réglages et des modifications ont été effectués. Les contrôles par comparaison avec un autre potentiomètre de haute précision, ainsi que par des mesures de piles rattachées directement à l'effet Josephson, indiquent que l'exactitude du potentiomètre JRL est d'environ 1×10^{-5} pour la détermination d'une différence de potentiel de 1 mV.

Appareils construits. — Parmi les appareils auxiliaires que nous avons construits pour diverses applications, citons :

— une enceinte thermorégulée (stabilité de température de ± 1 mK sur plusieurs mois) qui contient deux piles étalons utilisées comme tare pour le potentiomètre JRL;

— deux enceintes thermorégulées (stabilité ± 3 mK environ) qui contiennent des résistances fixes utilisées comme référence pour le pont qui sert à contrôler les sondes thermométriques en platine;

— un convertisseur numérique-analogique qui permet l'enregistrement des mesures effectuées avec un voltmètre-ohmmètre numérique.

Comparaison de représentations nationales du volt

Rattachement de V_{ASMW} à $V_{76\text{-BI}}$. — En même temps que ses étalons de résistance, l'ASMW a envoyé au BIPM deux groupes de six piles étalons : le premier constitué de piles nues définies à 20 °C et le second de piles conservées dans une enceinte à air thermorégulée à 30 °C. De l'importante série de mesures que nous avons effectuées, nous avons déduit :

$$V_{\text{ASMW}} = V_{76\text{-BI}} - 2,4 \mu\text{V} \text{ en juillet 1976.}$$

Comparaison restreinte d'étalons nationaux de force électromotrice. — Cette comparaison a été effectuée du 18 octobre au 22 décembre 1976. Les laboratoires suivants y ont participé : NPRL (4 piles à 30 °C), IEN (6 piles à 20 °C et 4 piles à 30 °C), Det Norske Justervesen (NJV) (4 piles à 30 °C), VSL (6 piles à 20 °C et 4 piles à 30 °C), Institut National de Métrologie de Roumanie (10 piles à 20 °C). Deux résultats sont déjà connus :

$$\left. \begin{aligned} V_{\text{NPRL}} &= V_{76\text{-BI}} - 1,78 \mu\text{V} \\ V_{\text{NJV}} &= \quad \quad - 1,02 \quad \quad \end{aligned} \right\} \text{ au 14 novembre 1976.}$$

Un rapport sera publié lorsque tous les laboratoires concernés nous auront communiqué la valeur de leurs étalons voyageurs après retour chez eux.

Rattachement de V_{NPL} à $V_{76\text{-BI}}$. — Rappelons que pour effectuer ce rattachement le NPL et le BIPM ont échangé simultanément des enceintes thermorégulées, de type commercial, contenant chacune 4 piles saturées.

Ces enceintes ont été transportées à la main avec le maximum de soin.

Les résultats obtenus sont :

$$\left. \begin{array}{l} \text{par l'enceinte du NPL : } V_{\text{NPL}} = V_{76\text{-BI}} + 0,12 \mu\text{V} \\ \text{par " du BIPM : } V_{\text{NPL}} = V_{76\text{-BI}} + 0,23 \mu\text{V} \end{array} \right\} \text{ au 15 juin 1976}$$
$$\text{en moyenne : } V_{\text{NPL}} = V_{76\text{-BI}} + 0,17 \mu\text{V}.$$

L'accord entre les résultats fournis par les deux enceintes est satisfaisant. Il montre que, dans les cas favorables et moyennant certaines précautions, ces enceintes permettent d'effectuer des comparaisons à 1×10^{-7} V près.

V_{NPL} et $V_{76\text{-BI}}$ sont théoriquement égaux (puisqu'égaux à l'échelon de potentiel qui correspondrait à une fréquence Josephson de 483 594,0 GHz); la différence observée est compatible avec les limites de précision (1 ou 2×10^{-7} V) actuellement admises par le NPL et le BIPM sur leur représentation du volt.

Enquête sur la représentation et la conservation des unités de résistance et de force électromotrice par les grands laboratoires nationaux

Depuis quelques années, tous les grands laboratoires nationaux ont entrepris de mettre en œuvre les méthodes nouvelles fondées sur l'application du théorème de Lampard-Thompson et l'utilisation de l'effet Josephson pour réaliser et conserver l'ohm et le volt. Les progrès sont rapides et constants, et il a paru utile de faire le point de l'état d'avancement et des résultats déjà obtenus dans les divers laboratoires à une date précise. On a choisi le 1^{er} janvier 1977. Un questionnaire a été adressé à tous les laboratoires qui effectuent des déterminations absolues de l'ohm ou qui ont mis en œuvre l'effet Josephson.

Comparaison internationale circulaire des étalons de capacité en silice de 10 pF

Le quatrième et dernier circuit de comparaison est en cours. Après avoir été réétudiés par le NBS, durant l'été 1976, à la fin du troisième circuit de comparaison, les trois condensateurs ont été envoyés à l'ASMW, Berlin, au début de l'automne 1976. Les trois condensateurs devront ensuite être étalonnés par l'IMM avant de retourner définitivement au NBS.

Études courantes

Le BIPM a étalonné 21 étalons de résistance (de valeurs comprises entre 0,01 et 10^4 Ω) et une trentaine de piles (définies à 20 °C ou à 30 °C) appartenant aux pays suivants : Autriche, Belgique, Finlande, Hongrie, Pays-Bas, Roumanie, Suisse, Tchécoslovaquie et Yougoslavie.

Équipement

En plus du potentiomètre JRL dont l'achat a déjà été mentionné, nous avons acquis :

— un « bain d'huile » (Guildline) permettant de réaliser à 1 mK près

toute température comprise entre 19 et 40 °C (détermination du coefficient de température des étalons de résistance ou étalonnage à une température différente de 20 °C);

- un dispositif de climatisation pour la cage de Faraday;
- un microvoltmètre, un mégohmmètre et un nanovoltmètre (Keithley) (réglage du courant dans le potentiomètre JRL, mesure des résistances d'isolement, détermination de faibles différences de température au moyen de thermocouples);
- un oscilloscope (Tektronix, modèle 5440) (travaux divers de laboratoire et remplacement éventuel, en cas de panne, de celui qui sert à poste fixe dans l'installation Josephson);
- une table antivibratoire (Tinsley);
- vingt-six piles, dont seize non saturées (Muirhead).

Pour étalonner la base de temps de notre compteur de fréquence, nous utilisons en commun avec la Section « lasers » un mesureur d'écarts de fréquence (Adret) associé à un oscillateur de référence (Adret) asservi sur la fréquence de l'émetteur français d'Allouis (exactitude de l'ordre de 5×10^{-10}).

Photométrie (J. Bonhoure)

Installations de mesure

Dans le Rapport de 1974 (p. 57), nous indiquions la construction d'un récepteur photoélectrique à affichage numérique. On a construit un deuxième appareil fonctionnant sur le même principe; toutefois le tube photoélectrique, de fabrication japonaise, est à cathode trialkaline.

Le BIPM dispose maintenant de quatre photomètres à tube photoélectrique: A3 et R1 à cathode Cs-Bi, A5 à cathode Cs-Sb, R2 à cathode trialkaline. Pour A3 et A5, montés avec un amplificateur utilisé en détecteur de zéro, les lectures sont faites sur un potentiomètre de compensation; pour R1 et R2, associés à un convertisseur courant-tension à amplificateur opérationnel, les lectures sont faites sur un voltmètre numérique.

On a vérifié, par la méthode additive, la linéarité des quatre photomètres pour un rapport d'éclairements de 2: les défauts observés sont tous très inférieurs à 0,1 %.

On a contrôlé ensuite la réponse spectrale des photomètres, en mesurant le rapport des intensités lumineuses émises par une même lampe à deux températures de répartition (2353 et 2853 K). A3 et A5 sont correctement corrigés; R1 et R2 le sont moins bien, mais de façon suffisante pour des comparaisons homochromes de lampes à incandescence.

Études courantes

On a effectué le contrôle de vingt-six lampes à incandescence (étalons d'intensité lumineuse, de flux lumineux ou de température de répartition) appartenant aux laboratoires nationaux d'Afrique du Sud et de Pologne.

Rayons X et γ , électrons (A. Allisy)

Rayons X (M. Boutillon*)

Dans le domaine de 100 à 250 kV, une comparaison indirecte d'étalons d'exposition a été effectuée en octobre 1976 avec le NPRL (Afrique du Sud).

La chambre d'ionisation de transfert utilisée était une petite chambre à plaques parallèles construite au NPRL. La comparaison a eu lieu pour les rayonnements de référence choisis pour les comparaisons internationales par la Section I du CCEMRI (Rapport 1976, p. 63). Les résultats sont donnés dans le tableau I. Les écarts obtenus sont compatibles avec les incertitudes expérimentales.

TABLEAU I
*Comparaison entre les étalons d'exposition
du NPRL et du BIPM*

Rayonnement	$\dot{X}_{\text{NPRL}} / \dot{X}_{\text{BIPM}}$
100 kV CDA = 4,027 mm Al	0,996 9
135 0,494 Cu	1,004 2
180 0,990 Cu	1,000 8
250 2,500 Cu	1,004 9

Dans ce domaine d'énergie, nous avons également étalonné un instrument de transfert pour l'Istituto Superiore di Sanità (ISS), Italie.

Dans le domaine des rayons X mous (10 à 50 kV), nous avons étalonné un instrument de transfert pour le NPRL.

Rayonnement γ du ^{60}Co (M.-T. Niatel*, M. Boutillon*, A.-M. Roux*)

Mesure de l'exposition; étalonnage de chambres de transfert

Deux chambres de transfert du type Shonka appartenant au National Institute of Radiation Protection, Suède, étalonnées au BIPM, l'une en 1970 et l'autre en 1972, ont été étalonnées à nouveau. Pour les deux chambres, la reproductibilité du facteur d'étalonnage s'est avérée meilleure que 0,1 %.

Mesure de la dose absorbée dans le graphite

Les mesures de dose absorbée sont en général effectuées dans le faisceau de notre nouvelle source de ^{60}Co (170 TBq). Pour utiliser ce faisceau, il a été nécessaire de mettre en place des dispositifs supplémentaires de protection: mur de plomb pour arrêter le faisceau à sa sortie du bâtiment, porte blindée entre la salle d'irradiation et la salle de mesure, chaînes pour interdire l'accès du pourtour (côté nord) du bâtiment, avertisseurs lumineux indiquant les périodes d'utilisation de la source.

a) *Détermination ionométrique du débit de dose absorbée.* — Les corrections nécessaires pour calculer le débit de dose absorbée à partir du courant

d'ionisation massive mesuré par la chambre d'ionisation de graphite placée dans le fantôme ont été déterminées par le calcul ou expérimentalement.

Les facteurs correctifs obtenus par le calcul sont \bar{f} (rapport moyen des pouvoirs de ralentissement de l'air et du carbone), K_p (qui tient compte de la perturbation due à la présence de la cavité au sein du graphite et qui est noté K dans le Rapport de 1976 p. 69) et K_i (qui permet de rapporter les mesures à un fantôme de dimensions latérales infinies). Les calculs antérieurs de \bar{f} et K_p , effectués pour la profondeur de référence (correspondant à 5 g/cm²) et le rayonnement primaire du ⁶⁰Co, ont été étendus : d'une part, on a couvert un domaine de masses surfaciques de 1 à 20 g/cm², d'autre part, on a tenu compte de la présence dans le rayonnement incident d'une part importante de rayonnement diffusé produit dans la source elle-même et dans les matériaux environnants. Des calculs par une méthode de Monte-Carlo nous ont permis d'estimer ce rayonnement diffusé et sa distribution spectrale : au total, sa fluence énergétique atteint 19 % de celle du rayonnement primaire. La présence de ce rayonnement diffusé incident modifie le spectre des photons à l'intérieur du fantôme et par suite celui des électrons. Il en résulte que, pour la profondeur de référence, K_p passe de 0,989 0 à 0,989 5 et \bar{f} de 0,990 7 à 0,989 9 ; le débit de dose absorbée, qui est proportionnel à K_p/\bar{f} , augmente donc de $1,3 \times 10^{-3}$. De plus, on a calculé le facteur K_i en utilisant comme pour K_p la méthode de Monte-Carlo : pour le fantôme du BIPM (diamètre 30 cm), $K_i = 1,000 15$ à la profondeur de référence.

Pour déterminer le facteur correctif K_s pour la recombinaison des ions, on a comparé les courbes de saturation obtenues avec les sources de 170 et 6 TBq. La correction totale est $1,6 \times 10^{-3}$ (recombinaison initiale $1,5 \times 10^{-3}$, recombinaison en volume $0,1 \times 10^{-3}$) pour les mesures de dose absorbée effectuées avec la source de 170 TBq.

Pour ces mesures de saturation, il était possible de laisser la source fixe. Dans ce cas, la reproductibilité est excellente (écart-type pour les moyennes de séries d'une même journée : 3 à 4×10^{-5}). Mais, dans de nombreux cas (par exemple pour les comparaisons d'étalons), les mesures nécessitent une intervention dans la région que l'on irradie. Il faut alors, entre les mesures, faire tourner le disque dans lequel est vissée la capsule entourant la source, afin d'amener cette dernière en position « repos ». On constate dans ce cas des écarts pouvant atteindre plusieurs millièmes. On a cherché à préciser l'origine de ce défaut de reproductibilité.

En déplaçant systématiquement de quelques millimètres la position « travail » de la source, on a montré que d'éventuelles différences de position de la capsule jouent un rôle négligeable et ne peuvent donc expliquer ces écarts. De plus, on a mesuré successivement, sans déplacer la source, la chambre étalon dans le fantôme et une chambre de Shonka placées l'une derrière l'autre dans le faisceau, puis on a répété de tels couples de mesures en faisant tourner le disque porte-source après chacun d'eux ; après chaque rotation, on constate que les réponses des deux chambres varient mais que leur rapport reste constant. Il semble que le manque de reproductibilité observé soit dû à des déplacements des grains de cobalt à l'intérieur de la capsule, déplacements provoqués par les chocs contre les butées qui déterminent les positions « repos » et « travail ». Nous étudions actuellement

diverses solutions possibles : réduction des chocs contre les butées, emploi d'une chambre témoin.

b) Comparaisons internationales d'étalons calorimétriques à l'étalon ionométrique du BIPM. — Deux étalons calorimétriques de dose absorbée, du NBS et du LMRI (Laboratoire de Métrologie des Rayonnements Ionisants, Saclay, France), ont été comparés à l'étalon ionométrique du BIPM.

Ces comparaisons ont été précédées de travaux préliminaires : construction du chariot destiné à supporter les calorimètres, acquisition et installation du système de vide secondaire pour les calorimètres, réalisation de la partie avant des fantômes de graphite commune aux différents étalons, mise au point d'un dispositif de mesure du temps d'irradiation des calorimètres.

Donnons quelques précisions sur ces deux derniers points.

En se fondant sur des mesures de transmission du rayonnement, on a ajusté les épaisseurs de cinq disques de graphite et obtenu ainsi un jeu de disques de masses surfaciques connues, qui furent utilisés comme il est indiqué plus loin.

Pour déterminer la durée d'irradiation d'un calorimètre, il faut tenir compte du temps de visibilité partielle de la source lors des rotations aller et retour du disque porte-source. Après avoir déterminé expérimentalement la variation de la réponse d'une chambre (simulant le détecteur du calorimètre) en fonction de l'angle de rotation θ du porte-source et la relation entre θ et le temps t à l'aller et au retour, on a placé deux minirupteurs (l'un déclenche le chronomètre électronique à l'instant t_1 et l'autre l'arrête à l'instant t_2) dont les positions sont choisies pour permettre une compensation : l'énergie totale reçue par le calorimètre doit être la même que si la source avait été entièrement vue pendant un temps égal à $t_2 - t_1$.

Les comparaisons d'étalons de dose absorbée ont été effectuées pour la profondeur de référence (correspondant à 5 g/cm^2) choisie par la Section I du CCEMRI et aussi pour d'autres profondeurs. Afin d'éliminer une cause importante d'erreur systématique, on a placé devant le détecteur (calorimètre ou chambre d'ionisation) le ou les mêmes disques de graphite (ceux du BIPM dont il a été question plus haut). Ainsi, pour une profondeur de mesure correspondant à x , on avait une masse surfacique de $x - a$ commune aux deux étalons (une masse surfacique $a \approx 1 \text{ g/cm}^2$ était propre à chaque détecteur).

Les résultats sont présentés dans le tableau II.

Les rapports des débits de dose absorbée s'écartent de l'unité de manière non significative, l'incertitude systématique pour ces rapports étant estimée à 7×10^{-3} . Les plus importantes causes d'erreurs ne sont pas d'origine expérimentale, elles sont dues à des données physiques (énergie moyenne \bar{W} nécessaire pour produire une paire d'ions, énergies moyennes d'excitation I intervenant dans le calcul de \bar{W}).

Parmi les sources d'erreurs systématiques, il faut signaler l'influence, pour une masse surfacique donnée, de la masse volumique du graphite et de sa répartition spatiale, influence qui a été mise récemment en évidence par diverses expériences. Ainsi, lorsqu'on intervertit l'ordre de deux disques de masses volumiques $1,74$ et $1,80 \text{ g/cm}^3$ placés à l'avant du fantôme, le

TABLEAU II
Comparaisons d'étalons de dose absorbée dans le graphite

Masses surfaciques correspondant aux profondeurs de mesure (valeurs nominales)	Rapport des débits de dose absorbée	
	$\dot{D}_{\text{NBS}}/\dot{D}_{\text{BIPM}}$	$\dot{D}_{\text{LMRI}}/\dot{D}_{\text{BIPM}}$
1 g/cm ²	0,999 2	
3	0,997 2	0,996 ₅
5	0,998 6	0,998
6		0,998
7	0,998 3	1,000
8		0,998
10	1,000 5	0,997
12	1,001 3	0,997 ₅
15	1,001 6	1,002
17		0,996

courant d'ionisation mesuré varie de $0,9 \times 10^{-3}$. Si l'on utilise des disques de graphite du NBS, de masses volumiques 1,64 à 1,70 g/cm³, les courants mesurés sont plus faibles, à masse surfacique égale, que ceux qui sont obtenus avec les disques du BIPM (masses volumiques 1,74 à 1,80 g/cm³). Les différences peuvent atteindre 5×10^{-3} pour une masse surfacique d'environ 11 g/cm².

Électrons (M. Boutillon*, A.-M. Roux*)

Expériences préparatoires à la mesure de \bar{W}

En vue de la mesure de l'énergie moyenne \bar{W} nécessaire pour créer une paire d'ions, pour des électrons de faible énergie (quelques keV), on a cherché à mettre au point une source d'électrons donnant une émission stable et on a étudié les caractéristiques d'une chambre pour la mesure de l'ionisation produite par ces électrons.

a) *Source d'électrons.* — Les électrons sont émis par un canon dont la cathode est un filament de tungstène thorié. Le courant d'électrons est mesuré par un collecteur de Faraday. L'ensemble canon et collecteur est placé dans une enceinte en acier inoxydable amagnétique, construite au BIPM, et dans laquelle on peut faire un vide secondaire d'environ 6×10^{-5} Pa à l'aide d'une pompe à diffusion.

Le choix du filament et celui de sa position, particulièrement critique, par rapport à la sortie de l'électrode de Wehnelt ont fait l'objet de nombreux essais.

On a construit une alimentation stabilisée pour le chauffage du filament, à laquelle on a ajouté un dispositif de contre-réaction. Le signal de contre-réaction est donné par le courant mesuré par le collecteur de Faraday.

Les conditions de fonctionnement obtenues actuellement sont les suivantes :

- tension d'accélération 500 à 1 200 V,
- courant d'électrons 1 à 2 μA ,
- stabilité du courant $0,5 \times 10^{-3}$ par heure environ, mais on a observé

de brusques « pointes » de courant dues à de faibles variations de pression (pouvant atteindre quelques dizaines de micropascals).

b) *Chambre d'ionisation.* — La chambre destinée à la mesure de l'ionisation produite par les électrons est un cylindre de longueur 1 m et de diamètre 12 cm. Une électrode excentrée assure la collection des ions. Un champ magnétique axial permet de maintenir la trajectoire des électrons à l'intérieur du cylindre. La pression utilisée pour la mesure de \bar{W} sera de l'ordre de 100 Pa. En attendant la mise au point de l'émission du canon à électrons, et pour permettre de cerner les problèmes qui vont se poser pour la mesure du courant de saturation à des pressions aussi faibles, la chambre a été provisoirement placée dans un faisceau de rayons X.

Des courbes de saturation ont été déterminées expérimentalement pour des pressions décroissantes allant de 20 000 Pa à 1 500 Pa avec et sans champ magnétique. Après différentes simplifications de la géométrie interne de la chambre, les courbes obtenues permettent de déterminer la valeur du courant de saturation. L'influence du champ magnétique rend plus facile la collection des ions. En effet, les trajectoires des électrons sont alors enroulées dans une zone centrale où le champ électrique est suffisamment fort pour collecter convenablement les ions. Des expériences sont actuellement en cours pour déterminer la courbe de saturation pour une pression de 100 Pa.

Radionucléides

Étalonnage de sources radioactives (A. Rytz, J. W. Müller)

Mises à part les études spéciales mentionnées plus loin, le travail du BIPM dans le domaine de la métrologie des radionucléides se poursuit dans deux directions différentes :

— relance des grandes comparaisons internationales, interrompues pendant neuf ans pour permettre l'étude de plusieurs problèmes fondamentaux,

— mesures relatives au moyen d'une chambre d'ionisation à intégration et d'une source de radium; mise en œuvre d'un système international de référence.

Comparaison internationale de mesures d'activité d'une solution de ^{139}Ce (mars 1976)

Soixante-dix pour cent des laboratoires nationaux et internationaux invités par le BIPM à prendre part à cette douzième comparaison ont soumis leurs résultats. La préparation minutieuse de la comparaison et la grande quantité d'informations fournies par les vingt-trois participants ont permis une analyse détaillée. Le compte rendu complet a été présenté dans le Rapport BIPM-77/4. Si l'on écarte les deux valeurs obtenues par un laboratoire en voie de développement, la dispersion des résultats ne dépasse guère un pour cent et n'est donc que légèrement plus élevée que celle des

cinq valeurs de la comparaison préliminaire de 1974 (voir *CCEMRI*, Section II, 3^e réunion (1975), p. R(II) 26).

Il est permis d'admettre que les problèmes particuliers relatifs à l'étalonnage de ce radionucléide sont résolus en grande partie et que les participants sont capables d'effectuer des échantillonnages corrects.

Ensemble de comptage par coïncidences $4\pi\beta(\text{CP})-\gamma$

La mise en œuvre d'un système automatique d'acquisition de données a marqué la dernière étape de la construction de cet ensemble et a apporté un gain considérable de temps et de sécurité. Toutes les données de chaque mesure peuvent désormais être enregistrées sur bande magnétique et exploitées directement par l'ordinateur IBM 1130 du BIPM avec un minimum d'intervention de la part de l'opérateur. Le matériel électronique, à l'exception de l'enregistreur de cassettes (Philips) inclus dans l'unité d'enregistrement (Automatismes et Systèmes), et le logiciel ont été construits et mis au point au BIPM. De nombreux essais ont permis de s'assurer de la fiabilité de ce système dont la construction est la même que celle du système correspondant qui est utilisé dans les mesures neutroniques (voir description sommaire p. 63 et Rapport BIPM-77/5).

Étalonnage et distribution de sources solides

Un stock d'une vingtaine de sources solides de ^{60}Co et de ^{54}Mn sur supports minces est disponible à tout moment afin de satisfaire les demandes courantes. Il est nécessaire de compléter ce stock et de le renouveler de temps en temps, compte tenu des périodes de décroissance des radionucléides. En outre, des mesures de contrôle sont effectuées plusieurs fois par an.

Alors que, normalement, le ^{60}Co ne pose pas de problème particulier, la préparation des sources de ^{54}Mn demande des précautions plus grandes

TABLEAU III

*Distribution de sources solides de ^{60}Co sur supports minces
Résultats des demandeurs, obtenus par comptage $4\pi\beta(\text{CP})-\gamma$*

Laboratoire demandeur	Source N°	Activité A_{lab} (Bq)	Écart-type (Bq)	Efficacité compteur β (%)	$\frac{A_{\text{lab}} - A_{\text{BIPM}}}{A_{\text{BIPM}}}$ (%)
CNEA (Argentine)	E 8	2 279,8	0,4	95,6	- 0,15
	4540	2 721,7	0,4	95,8	- 0,01
	9002	4 943,4	0,4	95,2	- 0,01
	E 20	5 238,7	0,5	97,3	- 0,07
	E 16	6 979,8	1,1	96,9	+ 0,04
PTB	E 18	5 017,1	0,3	97,8	- 0,04
	E 13	6 137,1	0,2	97,8	- 0,08
	E 23	9 537,3	0,8	96,0	+ 0,08

en raison des risques accrus de contamination préalable de la solution mère par des radionucléides difficiles à déceler. Les seuls moyens dont nous disposons pour contrôler la pureté radionucléidique du ^{54}Mn sont l'étalonnage de la solution mère, afin de comparer le résultat à la valeur indiquée par le fournisseur, et la mesure de la période (312,7 d). Ces mesures ont été effectuées sur une solution mise à notre disposition par la PTB, Braunschweig. Les résultats obtenus ayant été satisfaisants, une série de vingt-quatre sources a été préparée par électrolyse. Ces sources seront utilisables pendant au moins deux ans.

Quatre laboratoires ont demandé, au cours de l'année écoulée, à recevoir au total dix-neuf sources solides. Les résultats communiqués par les demandeurs sont reproduits dans le tableau III.

Mesures de l'activité de sources de ^{60}Co à taux de comptage élevés ; participation à une comparaison organisée par le NPL, Teddington

La méthode de comptage par coïncidences $4\pi\beta\text{-}\gamma$ est rarement appliquée à des taux de comptage très élevés. On peut penser que des corrections dues aux temps morts dépassant dix pour cent font diminuer l'exactitude des mesures. Cependant, il paraît intéressant d'effectuer une étude systématique afin de mieux connaître la limite pratique et, surtout, de déterminer ainsi la validité des différentes formules en usage pour calculer l'activité.

Conformément à une décision prise par la Section II du CCEMRI (3^e réunion (1975), p. R(II) 11), le NPL a organisé une comparaison entre huit participants, dont le BIPM. Chaque laboratoire a mesuré trois ou quatre jeux de huit sources de ^{60}Co dont les activités absolues et relatives, échelonnées de 5 à 100 kBq, avaient été soigneusement déterminées par le NPL. Les résultats obtenus par les participants furent tous envoyés au NPL qui les rassembla dans un rapport détaillé (3). Il en ressort, entre autres, que la plupart des formules habituellement utilisées sont des approximations à peu près suffisantes pour des taux de comptage inférieurs à $2 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$. Pour des taux plus élevés, les déviations augmentent progressivement et atteignent plusieurs pour cent à $1,5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$.

Le NPL a réussi à susciter l'intérêt de deux statisticiens du Département de mathématiques de l'Imperial College à Londres qui ont entrepris une étude approfondie des problèmes statistiques du comptage par coïncidences. Dans un récent article (4), on a établi, pour le taux des coïncidences, une formule rigoureuse qui peut être adaptée aux conditions expérimentales et qui représente un progrès décisif vers une solution de ce vieux problème.

Le rapport sur la comparaison organisée par le NPL met en évidence l'exactitude des résultats calculés selon la formule de Cox-Isham pour les taux de comptage considérés. Il discute aussi les autres difficultés qui peuvent se présenter dans ces conditions moins habituelles.

En dehors de cette comparaison, le BIPM a préparé et mesuré une trentaine de sources de ^{60}Co dont l'activité se situait entre 4 et 210 kBq.

(3) SMITH (D.), WILLIAMS (A.) and WOODS (M. J.), Report on the intercomparison of « high count rate » ^{60}Co 4π sources, organised by NPL on behalf of BIPM, Progress Report NPL, March 1977.

(4) COX (D. R.) and ISHAM (V.), A bivariate point process connected with electronic counters, *Proc. Roy. Soc. London*, A 356, 1977, pp. 149-160.

Ces mesures furent exploitées en utilisant soit une formule dérivée du travail de Cox et Isham, soit celle qui était couramment employée jusqu'à présent. Une partie des résultats est en accord avec les conclusions du rapport du NPL, tandis qu'une autre partie fait apparaître un comportement différent dont l'interprétation est encore douteuse. Des expériences supplémentaires seront nécessaires pour expliquer ces résultats.

Mesures relatives d'activité au moyen d'une chambre d'ionisation $4\pi\gamma$ à pression

Stabilité. — Comme cet équipement récemment mis en place est destiné à servir de référence internationale, il est très important de vérifier périodiquement sa stabilité. Cela est rendu possible par une seconde chambre

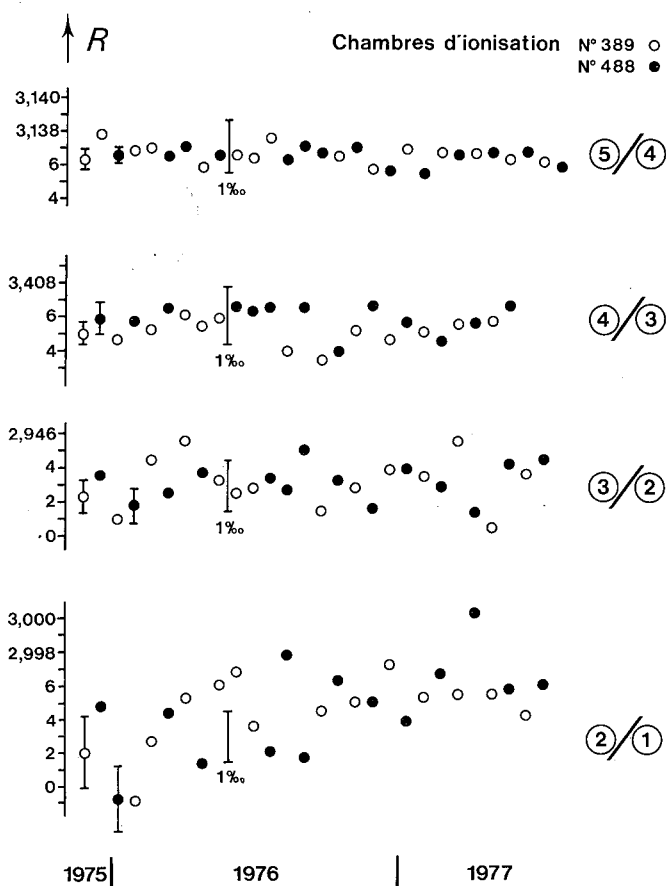


Fig. 7. — Stabilité des sources de référence de ^{226}Ra .

Les graphiques donnent les rapports R des courants d'ionisation produits par les sources N° 1 à N° 5, prises deux à deux dans l'ordre de leur activité. Les couples ainsi formés sont indiqués à droite. On a représenté séparément les résultats obtenus avec les deux chambres ainsi que leurs écarts-types.

d'ionisation identique à la première et par un jeu de sources de référence qui ne se distinguent entre elles que par leurs différentes teneurs en radium.

Ces mesures de contrôle, effectuées à peu près dix fois par an, consistent à comparer les courants d'ionisation produits par les sources prises deux à deux dans l'ordre de leur activité. Toutes ces comparaisons se font séparément dans chaque chambre et les rapports sont corrigés des courants I_0 enregistrés en l'absence de source ($I_0 \approx 0,03$ pA). Les résultats ainsi obtenus dès le début sont représentés à la figure 7. On notera, d'une part, que les deux chambres donnent les mêmes rapports de courants et, d'autre part, que ces rapports ne montrent pas de dérive, sauf peut-être pour le couple de sources N° 2 et N° 1. Une légère perte d'activité de la source la plus faible ne peut être exclue entièrement. Quant à la valeur absolue du courant d'ionisation produit par les sources de référence, aucune dérive n'a été observée pendant une période d'environ vingt mois.

Réponse des chambres en fonction de l'énergie des photons. — Au moyen des mesures de différentes sources d'activité connue, il a été possible d'établir une courbe de sensibilité (fig. 8). Cette courbe, bien que d'une exactitude limitée, sert à évaluer le courant que produirait une source donnée ou l'influence d'une impureté contenue dans une source déjà mesurée.

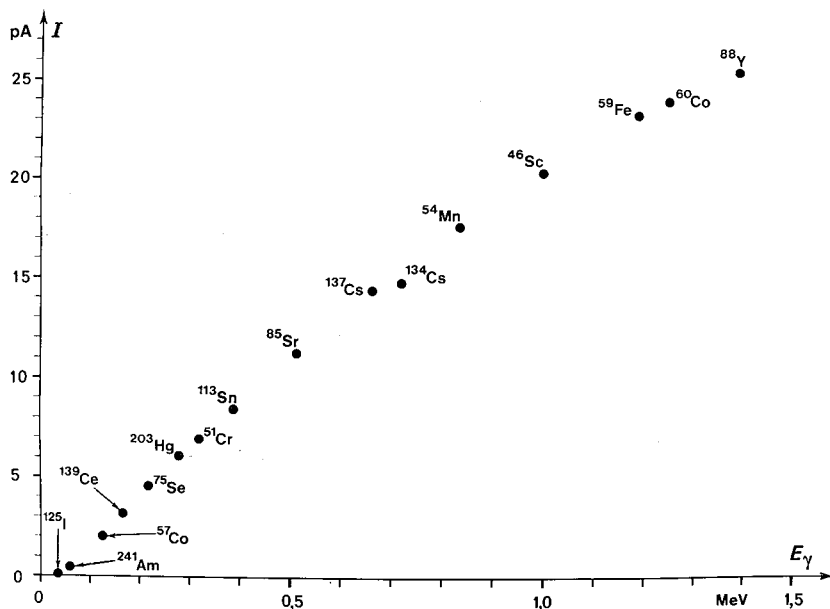


Fig. 8. — Courbe de sensibilité de la chambre d'ionisation N° 389.

Valeur du courant d'ionisation I produit par une source émettant 10^6 photons par seconde, en fonction de l'énergie des photons E_γ .

Système international de référence pour la mesure d'activité d'émetteurs de rayons γ . — Ce système a été créé dans le but de comparer entre elles et de manière continue les mesures d'activité effectuées dans les divers laboratoires participants. Il va de soi que l'on ne compare que des mesures concernant un même radionucléide.

B I P M

F-92310 SEVRES

International Reference System for Measuring Activity of Gamma-Ray Emitting Nuclides

Half-life adopted $T_{1/2} = (950.4 \pm 1.5) \text{ d}$ Registration Table for ^{22}Na

Sheet No. 1

Laboratory	Reference date	Method of standardization	Ampoule No.	Activity (kBq)	Relative uncertainties (%)			Ion chamber measurements		
					activity random	activity syst.	ion ch.	Date	Equivalent activity A_e (kBq)	
								mean value		uncertainty
ETL	76-11-01	$4\pi\beta - \gamma$	1	1 897.4	0.015	0.28	0.04	76-11-23	7 518	22
ETL			2	1 908.4	0.015	0.28	0.04	76-11-23	7 516	22
NPL	76-12-20	calibrated high-pressure	32	591.6	0.15	2.0	0.05	77-01-04	7 538	150
NPL		ionization chamber	33	592.8	0.15	2.0	0.05	77-01-04	7 542	150
UVVVR	77-04-14	$4\pi\beta - \gamma$	ER 3-2	3 993	0.06	0.40	0.05	77-05-13	7 526	31
OMH	77-04-30	$4\pi\beta - \gamma$	3 588	1 384.3	0.21	0.60	0.06	77-05-25	7 547	44
OMH			3 589	1 384.3	0.21	0.60	0.06	77-05-25	7 542	44

Half-life adopted $T_{1/2} = (83.80 \pm 0.03) \text{ d}$ Registration Table for ^{46}Sc

Sheet No. 1

Laboratory	Reference date	Method of standardization	Ampoule No.	Activity (kBq)	Relative uncertainties (%)			Ion chamber measurements		
					activity random	activity syst.	ion ch.	Date	Equivalent activity A_e (kBq)	
								mean value		uncertainty
AECL	76-09-29	$4\pi\beta(\text{PC}) - \gamma$	1	1 447.2	0.01	0.30	0.05	76-10-18	8 310	25
AECL			2	1 088.7	0.01	0.30	0.05	76-10-18	8 316	25
ETL	76-11-01	$4\pi\beta(\text{PC}) - \gamma$	1	956.09	0.02	0.42	0.06	76-11-18	8 316	36
ETL			2	958.64	0.02	0.42	0.06	76-11-18	8 317	36

Fig. 9. — Reproduction de deux tableaux d'enregistrement.

Pour que la précision des mesures soit optimale, il faut que les échantillons aient tous le même volume et soient contenus dans le même type d'ampoule. Plusieurs modèles d'ampoules ont été examinés avant de choisir finalement celui qui est couramment utilisé au NBS. Ce laboratoire a généreusement offert au BIPM un lot de 5 000 ampoules fabriquées à partir du même bloc de verre. L'uniformité des dimensions a été contrôlée⁽⁵⁾ sur un nombre représentatif de ces ampoules.

L'expérience acquise pendant la première année de l'existence de ce système a permis d'établir une organisation pratique et efficace. Les résultats distribués sous forme de tableaux d'enregistrement expriment l'activité qui, selon l'étalement du participant, serait nécessaire pour produire le même courant d'ionisation que la plus forte des sources de radium prise à une date fixe. Les valeurs absolues ainsi obtenues ne sont pas directement utilisables. Comme, dans la plupart des cas, l'incertitude des résultats est surtout de caractère systématique, il ne semblait pas utile de traiter séparément la partie aléatoire; on n'indique qu'une valeur globale. La figure 9 reproduit, à titre d'exemple, deux tableaux d'enregistrement. Des tableaux semblables ont été établis pour chaque radionucléide.

Le succès de ce nouveau système de référence est très encourageant et il est permis d'espérer que les laboratoires participants continueront leur effort. Il est prévu, en outre, d'établir des liens avec un système analogue créé il y a quatre ans par l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique, Vienne.

Statistiques de comptage (J. W. Müller)

Dans le but de mieux comprendre les processus sur lesquels s'appuie la méthode $4\pi\beta\text{-}\gamma$ pour la mesure absolue d'activités et d'en tirer profit dans les applications, en particulier sous forme de corrections plus sûres, on a de nouveau entrepris un certain nombre d'études. A titre d'exemple, deux d'entre elles seront brièvement décrites, tout en se limitant à quelques résultats d'intérêt général et en omettant les dérivations que l'intéressé peut trouver dans les rapports internes du BIPM.

Résultats asymptotiques pour l'espérance et la variance du nombre d'impulsions enregistrées

Si l'on ne se contente pas d'identifier un processus réel de comptage à un simple processus de Poisson, mais qu'on essaie de le décrire par un meilleur modèle qui tient compte des modifications apportées d'une part par l'imposition de temps morts et, d'autre part, par le choix des conditions initiales (origine du temps de mesure par rapport à l'arrivée d'une impulsion), l'évaluation de résultats utiles pour des applications se complique beaucoup. Néanmoins, grâce aux efforts faits par plusieurs auteurs, on dispose maintenant d'une liste pratiquement complète des paramètres les plus importants servant à caractériser le comportement statistique de tels processus. Il s'agit, en particulier, de la probabilité $W_k(t)$ d'observer exactement k

⁽⁵⁾ Les nombreuses mesures nécessaires pour ce contrôle ont été effectuées avec le plus grand soin par Mr R. Foucart, INM, Paris, que nous remercions vivement.

événements dans un intervalle de temps t et des deux premiers moments de k , c'est-à-dire de l'espérance $\hat{k}(t)$ et de la variance $\sigma_k^2(t)$.

On admet au départ que l'on a affaire à un processus original de Poisson et que le type et la valeur du temps mort sont connus. Les calculs nécessaires pour traiter les six cas particuliers (trois types de processus et deux types de temps mort) sont en général assez fastidieux et donc sujets à erreurs. De plus, ils ne se prêtent que difficilement à une éventuelle extension à des conditions plus générales.

Pour la situation habituellement rencontrée où le temps de mesure t est long par rapport aux intervalles entre impulsions successives, il existe des procédés mathématiques permettant de déduire des relations dites asymptotiques d'une grande généralité pour des processus de renouvellement, et c'est de ce fait que l'on peut essayer de tirer parti pour nos besoins.

Le modèle approprié est un processus du type « modifié » pour lequel la densité d'intervalles entre impulsions est donnée par $f(t)$, tandis que l'arrivée du premier événement (après $t = 0$) est décrite par ${}_0f(t)$. Par conséquent, à l'arrivée de l'impulsion numéro k correspond la densité

$$\varphi_k(t) = \begin{cases} {}_0f(t) & \text{pour } k = 1, \\ {}_0f(t) * \{f(t)\}^{*(k-1)} & \text{pour } k \geq 2. \end{cases}$$

La fonction ${}_0f(t)$ sera spécifiée plus tard pour les différents modes de comptage.

On peut montrer que la forme asymptotique des moments du nombre k d'événements arrivant dans l'intervalle t s'exprime à l'aide des moments se référant aux intervalles, donc de $f(t)$ et ${}_0f(t)$. Il est usuel de définir le moment ordinaire d'ordre r de t par

$$m_r = \int_0^\infty t^r \cdot f(t) dt, \quad r = 1, 2, \dots,$$

ou aussi le moment centré par

$$\mu_r = \int_0^\infty (t - m_1)^r \cdot f(t) dt, \quad r = 2, 3, \dots$$

De façon analogue, on définit les moments ${}_0m_r$ et ${}_0\mu_r$ de t pour la densité ${}_0f(t)$.

Au lieu de μ_2 on note le plus souvent σ^2 . Après un certain nombre de calculs intermédiaires, que l'on fait avantageusement avec les transformées, on peut arriver aux expressions limites suivantes

$$\hat{k}(t) \simeq \frac{t}{m_1} + \frac{1}{2} - \frac{{}_0m_1}{m_1} + \frac{\sigma^2}{2m_1^2}$$

et

$$\sigma_k^2(t) \simeq \frac{2}{m_1^2} \cdot t + \frac{1}{12} + \frac{{}_0\sigma^2}{m_1^2} - \frac{{}_0m_1 \cdot \sigma^2}{m_1^3} - \frac{2\mu_3}{3m_1^3} + \frac{5\sigma^4}{4m_1^4},$$

qui donnent la valeur moyenne et la variance du nombre k d'impulsions pour l'intervalle t . Ce résultat général, valable pour un processus de renouvellement du type modifié, peut être utilisé pour en déduire des relations se rapportant soit à un processus ordinaire (or), avec une impulsion à

$t = 0$, soit à un processus stationnaire (st), où l'origine du temps est choisie au hasard.

Pour un processus ordinaire, puisque ${}_0f(t) = f(t)$, on trouve

$${}_0\hat{k}(t) \simeq \frac{t}{m_1} - \frac{1}{2} + \frac{\sigma^2}{2m_1^2}$$

et

$${}_0\sigma_k^2(t) \simeq \frac{\sigma^2}{m_1^2} \cdot t + \frac{1}{12} + \frac{5\sigma^4}{4m_1^4} - \frac{2\mu_3}{3m_1^3}$$

Pour un processus stationnaire on a ${}_0f(t) = \frac{1}{m_1} \int_t^\infty f(x) dx$, d'où l'on déduit pour les moments

$${}_0m_1 = \frac{m_1^2 + \sigma^2}{2m_1}$$

et

$${}_0\sigma^2 = \frac{1}{12m_1^2} (m_1^4 + 6m_1^2\sigma^2 + 4m_1\mu_3 - 3\sigma^4).$$

Par conséquent,

$${}_{st}\hat{k}(t) = \frac{t}{m_1}$$

et

$${}_{st}\sigma_k^2(t) \simeq \frac{\sigma^2}{m_1^2} \cdot t + \frac{1}{6} + \frac{\sigma^4}{2m_1^4} - \frac{\mu_3}{3m_1^3}$$

Si l'on spécialise encore les conditions en admettant, par exemple, un processus original de Poisson perturbé par un temps mort, on retrouve en effet les résultats obtenus auparavant. Or, les avantages de la nouvelle approche ne sont pas seulement d'ordre esthétique: il s'agit bien d'une généralisation qui permet de décrire des situations où, par exemple, le temps mort ne correspond pas à un des types usuels et où le processus original n'est pas nécessairement poissonien. Pour tous les détails on consultera le Rapport BIPM-77/1.

L'effet Gandy pour un temps mort cumulatif

Toute application de la méthode des coïncidences où les impulsions arrivant simultanément sur deux (ou plusieurs) voies sont détectées par un dispositif électronique à temps de résolution r , nécessite la subdivision du taux de comptage mesuré en une partie dite vraie et une autre dite fortuite. Pendant de longues années, cette séparation s'effectuait expérimentalement en insérant dans une des voies un retard suffisamment long pour n'avoir que des coïncidences fortuites. Par simple soustraction de cette contribution du taux de comptage total, on croyait pouvoir obtenir la partie recherchée, c'est-à-dire les coïncidences vraies.

Cependant, dans un travail publié déjà en 1961 ⁽⁶⁾, A. Gandy avait indiqué la nature fallacieuse de ce raisonnement apparemment simple en montrant que le taux de comptage C_3 des coïncidences fortuites est lui-même fonction du retard δ . La valeur dont on a besoin à l'endroit $\delta = 0$

(6) GANDY (A.), Mesure absolue de l'activité des radionucléides par la méthode des coïncidences bêta-gamma à l'aide de détecteurs de grande efficacité. Étude des coïncidences expérimentales, *Int. J. Appl. Rad. Isotopes*, **11**, 1961, pp. 75-91.

ne peut donc pas être mesurée ailleurs et il est nécessaire d'effectuer la correction exacte par le calcul.

La théorie de Gandy, qui était incomplète et pas toujours facile à suivre, a incité peu de gens à s'occuper plus en détail de ce problème. En général, on s'est contenté de s'assurer par des contrôles directs que le décalage effectif δ était suffisamment petit pour permettre l'utilisation de la valeur correspondant à $\delta = 0$. Ce n'est que récemment que l'on s'est aperçu que cette manière de contourner la difficulté, applicable dans la plupart des mesures d'activité, n'est plus permise dans les cas où le taux des coïncidences, mesuré en fonction du retard, est utilisé pour la détermination de la période de l'état intermédiaire (méthode des coïncidences retardées). Ici, il est nécessaire de tenir compte de la correction correspondante, au moins pour les cas où la période est de l'ordre des temps morts impliqués et en particulier pour des taux de comptage élevés.

Tandis que les résultats de Gandy, en raison des difficultés considérables de calcul, ne sont qu'approximatifs, il nous est apparu qu'une évaluation rigoureuse du taux des coïncidences fortuites en fonction du retard est possible et même facile si l'on admet que les temps morts insérés dans les deux voies sont du type cumulatif. Un calcul s'appuyant sur cette hypothèse a été fait récemment pour un processus original de Poisson (*voir* Rapport BIPM WPN-207). En utilisant la notation introduite dans la figure 10 et en admettant, pour simplifier l'écriture, $\tau_\beta = \tau_\gamma = \tau$ (temps morts égaux) et $r_\beta = r_\gamma = r$ (longueurs égales des impulsions bêta et gamma à l'entrée du mélangeur des coïncidences), on obtient après un calcul assez long, mais tout à fait élémentaire, pour les différents domaines du retard (supposé inséré dans la voie bêta), les expressions suivantes (si $\tau \geq 2r$)

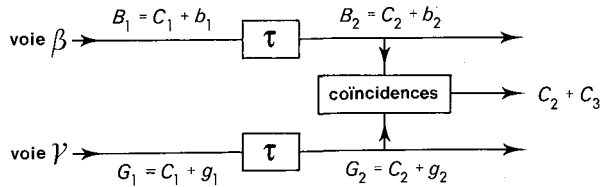


Fig. 10. — Notation utilisée pour les taux de comptage.

C_1 et C_2 désignent les coïncidences vraies, C_3 les coïncidences fortuites. Pour une activité N_0 de la source et des efficacités ε_β et ε_γ des détecteurs respectifs, on a $B_1 = \varepsilon_\beta \cdot N_0$, $G_1 = \varepsilon_\gamma \cdot N_0$ et $C_1 = \varepsilon_\beta \varepsilon_\gamma \cdot N_0$. Les temps morts sont supposés égaux et cumulatifs.

— pour $|\delta| \leq r$:

$$C_3(\delta) = \frac{1}{C_1} \{ G_2 \tilde{b}_1 [1 - e^{-C_1(r+\delta)}] + B_2 \tilde{g}_1 [1 - e^{-C_1(r-\delta)}] \},$$

— pour $r \leq |\delta| \leq \tau - r$:

$$C_3(\delta) = \frac{1}{C_1} [\Delta_+ \cdot G_2 \tilde{b}_1 + \Delta_- \cdot B_2 \tilde{g}_1] \cdot (e^{2C_1 r} - 1) \cdot e^{-C_1(r+\delta)},$$

— pour $\tau - r \leq |\delta| \leq \tau + r$:

$$C_3(\delta) = \frac{1}{C_1} (\Delta_+ \cdot G_2 \tilde{b}_1 + \Delta_- \cdot B_2 \tilde{g}_1) \cdot [e^{-C_1(|\delta|-r)} - e^{-C_1\tau}] + B_2 G_2 (|\delta| + r - \tau),$$

— pour $|\delta| \geq \tau + r$:

$$C_3(\delta) = B_2 G_2 2r,$$

où

$$\tilde{b}_1 = b_1 e^{-b_1 \tau}, \quad \tilde{g}_1 = g_1 e^{-g_1 \tau}$$

et

$$\Delta_{\pm} = U(\pm \delta), \quad \text{donc} \quad \Delta_+ = 1 \quad \text{et} \quad \Delta_- = 0 \quad \text{pour} \quad \delta > 0, \\ \text{mais} \quad \Delta_- = 1 \quad \text{et} \quad \Delta_+ = 0 \quad \text{pour} \quad \delta < 0.$$

Pour un cas spécifique (bien qu'extrême), le taux de comptage pour les coïncidences fortuites est représenté à la figure 11. Une simulation directe du processus par la méthode de Monte-Carlo, faite pour les mêmes conditions, est également indiquée; elle est en excellent accord avec la prévision théorique.

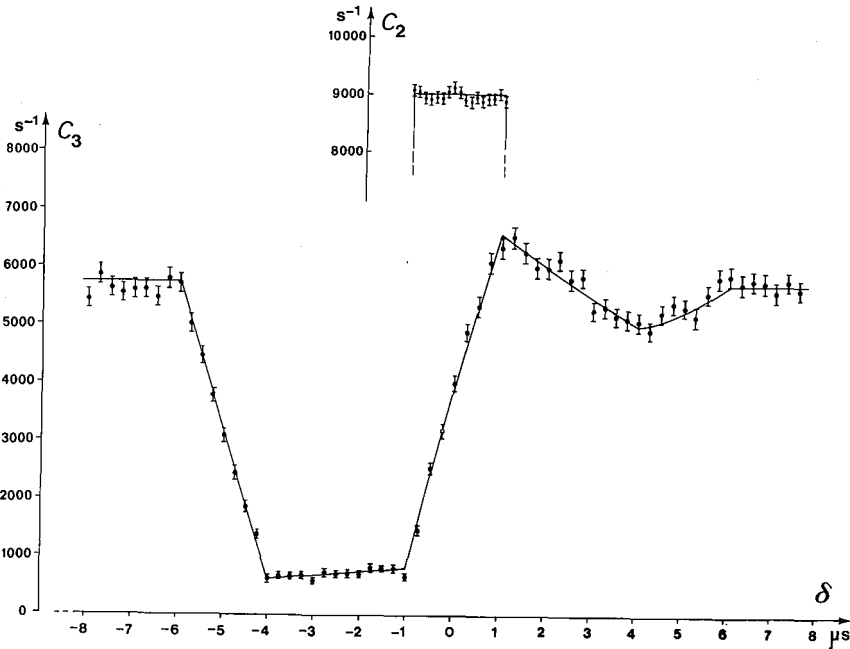


Fig. 11. — Représentation graphique de l'effet Gandy pour des temps morts cumulatifs.

C_2 et C_3 indiquent les taux de comptage pour les coïncidences vraies et fortuites, respectivement. Les valeurs des paramètres utilisés sont $N_0 = 500\,000 \text{ s}^{-1}$; $\epsilon_p = 0,9$, $\epsilon_\tau = 0,2$; $\tau = 5 \mu\text{s}$ et $r = 1 \mu\text{s}$. La courbe est calculée et correspond aux formules indiquées dans le texte tandis que les points résultent d'une simulation par la méthode de Monte-Carlo.

Le taux des coïncidences vraies, donné par

$$C_2 = C_1 e^{-(B_1 + G_1 - C_1)\tau},$$

reste invariable à l'intérieur du temps de résolution (c'est-à-dire pour $|\delta| < r$) et disparaît ailleurs; sa valeur numérique est bien vérifiée par la même simulation.

Pour les mesures expérimentales, qui sont en préparation, on n'attend pas seulement un certain lissage de la courbe à cause du « time jitter », mais surtout des déformations qui seront dues aux effets d'empilement négligés dans ces considérations, mais dont on sera obligé de tenir compte dans une étape ultérieure.

Autres travaux

A part les travaux déjà mentionnés, on a fait, pour le cas d'une seule voie de comptage, une étude comparative sur la variance (Rapport BIPM-76/15) qui fait suite à une exploration semblable précédente sur la valeur moyenne. Il s'agit dans les deux cas des valeurs asymptotiques pour les divers processus de comptage. De façon préliminaire, on a également étudié l'influence de la décroissance d'une source radioactive sur la répartition des intervalles d'impulsions successives (Rapport BIPM-76/9).

Dans le domaine des coïncidences, quelques remarques critiques ont été faites sur les formules traditionnellement utilisées (Rapport BIPM-76/16). Pour un temps mort cumulatif, on a indiqué la dérivation d'expressions exactes pour les coïncidences vraies (Rapport BIPM-77/2), de même que pour les coïncidences fortuites (Rapport BIPM-77/3), dans les deux cas sans tenir compte d'un éventuel retard relatif.

Enfin, notre atelier d'électronique a construit un appareil (appelé convertisseur de vitesse) qui permet d'enregistrer la répartition dans le temps des différentes impulsions dont on dispose dans un ensemble à coïncidences. Cet appareil est décrit dans le Rapport BIPM-76/14. Les enregistrements seront également instructifs pour l'étude du comportement réel des circuits électroniques.

Spectrométrie alpha (A. Rytz)

Dans le but de préparer et d'adapter l'installation entière aux expériences futures destinées à combler quelques lacunes de la liste des énergies de particules α , on y a apporté plusieurs améliorations et effectué une série de mesures à titre d'essai.

Nouvel étalon de longueur du spectrographe

D'une importance capitale, cette partie de l'appareillage a été reconstruite et modifiée pour

- obtenir une thermorégulation plus efficace,
- rendre plus aisées et plus précises les mesures de distances,
- réduire le fond des spectres (contamination, particules diffusées).

Le comparateur universel ayant été temporairement démonté à cause des travaux à l'Observatoire, le contrôle des distances de la fente à chacun

des 24 marqueurs doit actuellement se limiter aux intervalles entre les marqueurs eux-mêmes. Ce contrôle a pu se faire à l'aide du petit comparateur d'Abbe qui sert au dépouillement des plaques photographiques. On a mesuré les intervalles sur plusieurs plaques, d'une part, et sur le porte-plaque lui-même, d'autre part. Les différences entre les résultats de ces deux types de mesures et les valeurs des intervalles déduites des mesures antérieures des distances fente-marqueurs ont une valeur moyenne pratiquement nulle avec des écarts-types respectifs de $2,3 \mu\text{m}$ et $1,3 \mu\text{m}$. Ces mesures faciles et rapides prouvent l'exactitude de l'échelle de référence copiée sur chaque plaque exposée.

Deux plaques ont été placées dans le porte-plaque, l'une après l'autre, et laissées dans le vide pendant quinze jours chacune. Les plaques développées ont été examinées afin de déterminer le fond de traces de particules α provenant des surfaces métalliques et de la plaque. Ce fond détermine la limite inférieure de l'activité massique de la source qui est nécessaire pour obtenir un résultat utile. Cela devient important quand la période de la source dépasse quelques centaines d'années.

Mesures de contrôle avec des sources de ^{242}Cm

Cet émetteur de particules α est particulièrement adapté aux essais de ce genre à cause de son spectre simple, de sa période ni trop longue, ni trop courte (163 d), et de son prix modéré. Plusieurs sources ont été préparées par évaporation sous vide. La plus forte d'entre elles (0,7 MBq) a été utilisée dans une série de douze poses successives, d'une durée totale de seize jours. Entre deux poses, la source fut déplacée de 0,5 à 1 mm, parallèlement à l'axe du spectrographe. A chaque pose une nouvelle plaque fut exposée, sur laquelle on a établi, après développement, la position de la raie principale du ^{242}Cm . Ces résultats ont permis de déterminer avec certitude la position que la source doit occuper par rapport à la fente.

Le support sur lequel est déposée la matière radioactive a une influence considérable sur la netteté des raies spectrales. Deux essais ont été effectués avec des supports de verre. Le premier était simplement un morceau de couvre-objet de microscope; il a donné un bon résultat, malgré la faible conductibilité du matériau. Le deuxième était un morceau de « metglas » (verre métallique) et le résultat était particulièrement favorable. Cet alliage très spécial pourrait bien être le support idéal pour ces sources. Les essais seront poursuivis.

En outre, la pose avec la source sur « metglas » fut répétée en utilisant une valeur différente du champ magnétique. Les valeurs d'énergie obtenues dans les deux mesures concordent entre elles et avec notre résultat antérieur (*) à mieux que 30 eV près.

Ces travaux ont permis de mettre au point tous les détails d'une mesure prochaine (^{239}Pu) pour laquelle un fonctionnement optimal sera indispensable.

(*) GRENNBERG (B.) and RYTZ (A.), Absolute measurements of α -ray energies, *Metrologia*, 7, 1971, pp. 65-77 et *Recueil de Travaux du BIPM*, 3, 1971-1972 (article 26).

Mesures neutroniques (V. D. Huynh)

Comparaison internationale des mesures de débit de fluence de neutrons rapides monocinétiques

Neuf laboratoires ont participé à la comparaison. Les résultats ont été présentés à la conférence « International Specialists Symposium on Neutron Standards and Applications » tenue en mars 1977 au NBS, Gaithersburg. Le tableau IV récapitule la situation concernant les régions d'énergie choisies, les instruments de transfert utilisés et les laboratoires participants.

TABLEAU IV

Récapitulation de la comparaison

Les laboratoires indiqués entre parenthèses n'ont pas encore terminé leurs mesures.

Energie des neutrons	Instrument de transfert	Laboratoires participants
250 keV	sphère de polyéthylène + BF ₃	NRC, CEN, BCMN, NPL, ETL, PTB, NBS
	compteur à ³ He	NRC, CEN, NPL, ETL, PTB, NBS
565 keV	sphère de polyéthylène + BF ₃	NRC, CEN, NPL, ETL, PTB, NBS
	compteur à ³ He	
2,20 MeV	sphère de polyéthylène + BF ₃	CEN, BCMN, NPL, PTB
2,50 MeV	sphère de polyéthylène + BF ₃	BIPM, NRC, CEN, BCMN, NPL, ETL, PTB, (IMM)
14,8 MeV	chambre à fission (²³⁸ U)	CEN, BCMN, NPL, ETL, BIPM, (IMM, NRC, PTB)
	feuilles de fer : réaction ⁵⁶ Fe(n,p) ⁵⁶ Mn	NPL, BCMN, IMM, ETL, BIPM, (NRC, PTB)

La Section III du CCEMRI a décidé, lors de sa dernière réunion (30 mai-1^{er} juin 1977) de ne plus accepter de nouveau laboratoire participant. Cependant, les laboratoires suivants: IMM (pour les énergies de 2,50 MeV et 14,8 MeV), PTB (14,8 MeV) et NRC (14,8 MeV), qui ont l'intention de compléter leur comparaison, sont autorisés à effectuer leurs mesures avant la fin de l'année 1977.

On peut tirer les conclusions suivantes des résultats obtenus:

— Dans l'ensemble, un assez bon accord (dispersion de l'ordre de 5 %

ou moins) a été obtenu, sauf dans le cas de 250 keV où l'écart est de 10 à 20 %. Il semble que pour cette énergie la correction pour la contribution de neutrons diffusés soit erronée.

— La valeur du débit de fluence de neutrons a été mesurée par chaque laboratoire participant avec une exactitude de 2 à 3,5 %. Un grand effort est donc encore nécessaire pour améliorer ces mesures afin d'atteindre une exactitude de 1 %.

— La sphère de polyéthylène avec compteur à BF_3 utilisée comme instrument de transfert présente un inconvénient important dû à sa grande sensibilité aux neutrons diffusés. Les résultats de la comparaison suggèrent que l'on devrait utiliser une barre d'ombre plutôt que la loi de l'inverse du carré de la distance pour évaluer la contribution de neutrons diffusés.

— Un bon accord a été obtenu dans la comparaison à 14,8 MeV. Néanmoins, le diamètre de la chambre à fission devrait être au moins doublé afin de réduire l'incertitude due à la mesure de distance.

— Enfin, un nouvel instrument de transfert reste à trouver. Il devrait être fiable, peu sensible aux neutrons diffusés et aux rayons γ et posséder une efficacité pas trop faible. Si cela était possible, on devrait utiliser, pour chaque énergie, deux instruments de transfert reposant sur deux principes différents.

Source de neutrons de 14,7 MeV du BIPM

Rappelons que le débit de fluence de neutrons de 14,7 MeV produits par la réaction ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$ est mesuré au BIPM par la méthode de la particule associée (Rapport 1976, p. 92).

Afin de rechercher une erreur systématique éventuelle dans la détermination du débit de fluence, nous avons effectué plusieurs séries de mesures en prenant un long compteur comme moniteur et en modifiant les conditions expérimentales pour le comptage des particules ${}^4\text{He}$. Les modifications sont les suivantes :

1. changement de la jonction (avec résolution différente),
2. mesures avec ou sans écran devant la jonction,
3. changement du diamètre de diaphragme (devant la jonction) qui donne l'angle solide de détection des particules ${}^4\text{He}$,
4. changement de la distance jonction-cible.

Toutes les mesures ont été effectuées avec un faisceau de deutons de 140 keV et un courant cible de 20 μA . Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau V.

En conclusion, la cohérence des résultats obtenus pour la sensibilité du long compteur montre qu'on n'a pas pu mettre en évidence une erreur systématique quelconque dans la détermination du débit de fluence de neutrons de 14,7 MeV.

Enregistrement de données sur cassettes à ruban magnétique

La possibilité d'exploiter directement sur notre ordinateur des bandes magnétiques en cassettes nous a amenés à nous équiper d'un système automatique d'acquisition de données sur ce type de support. A cet effet,

TABLEAU V

Conditions expérimentales pour le comptage des particules ^4He

Le long compteur est utilisé comme moniteur

Par rapport à la direction du faisceau incident, la jonction est placée à 150° et le long compteur à 27° .

La distance de la cible au long compteur est 2,0 m pour la série de mesures *a* et 1,513 m pour la série *b*.

La sensibilité est exprimée en nombre de coups pour 1 neutron par cm^2 . Les valeurs de la sensibilité données ici ont surtout une signification comparative, car on ne connaît pas bien la contribution de neutrons diffusés.

Conditions expérimentales					Sensibilité	
Numéro de la mesure	Numéro de la jonction	Distance jonction-cible (cm)	Écran	Diamètre du diaphragme (mm)	du long compteur	
<i>a</i>	1	11-399G	99,39	sans	4	2,570
	2	"	"	"	"	85
	3	"	"	"	"	59
	4	"	"	"	"	87
	5	"	"	"	3	50
	6	14-746A	"	"	4	65
	7	"	"	avec	"	68
	8	"	"	"	"	65
	9	"	"	sans	3	52
	10	"	"	"	"	47
	11	"	"	"	"	58
	12	"	"	avec	"	68
	13	"	"	"	"	75
<i>b</i>	1	11-399G	99,39	sans	4	2,556
	2	"	"	"	"	58
	3	"	"	"	"	67
	4	"	49,37	avec	"	58
	5	"	"	"	"	57
	6	"	"	"	"	26
	7	"	"	"	"	57
	8	"	"	sans	"	27
	9	"	"	"	"	62
	10	"	"	"	3	32
	11	"	"	"	"	69

nous avons acquis une unité d'enregistrement (Automatismes et Systèmes, Arcueil, France) équipée d'un lecteur-enregistreur de cassettes (Philips). Cette unité est analogue à celle qui est utilisée pour les mesures de longueur (Rapport 1976, p. 27 et ce volume, p. 23). Les données lui sont fournies par octets (validés par un signal d'acquisition); elle les groupe en blocs de 256 octets dont elle assure l'enregistrement après les avoir complétés par quatre octets de contrôle. La qualité de l'enregistrement est vérifiée grâce à une lecture simultanée. En cas d'anomalie, le bloc est effacé et réenregistré.

Nous disposons déjà, depuis plusieurs années, d'un système d'acquisition sur imprimante; il a été décrit dans le Rapport BIPM-75/2. Nous avons construit un circuit d'interface pour adapter la nouvelle unité d'enregistrement aux dispositifs existants (fig. 12) et nous avons établi les programmes nécessaires à l'exploitation des données ainsi enregistrées. Le Rapport BIPM-77/5 décrit l'interface et le principe des programmes.

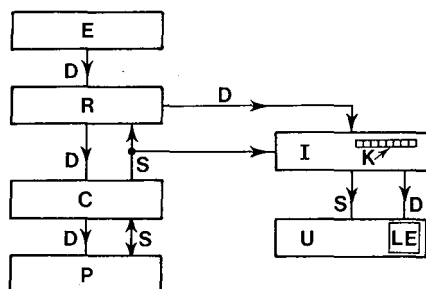


Fig. 12. — Interconnexions entre les éléments du système d'acquisition de données.

E, échelles de comptage; R, registres; C, circuit de commande de l'impression; P, imprimante; I, interface avec clés K (composition manuelle de données); U, unité d'enregistrement équipée du lecteur-enregistreur de cassettes LE; D, transfert des données; S, signaux de commande et de synchronisation.

L'interface transmet à l'unité d'enregistrement soit des caractères composés au moyen de clés et utilisés par exemple pour identifier une expérience, soit le contenu des échelles de comptage. Dans ce dernier cas, les transferts de données, d'une part depuis les registres associés aux échelles de comptage et aux circuits d'impression vers l'interface, d'autre part depuis l'interface vers l'unité d'enregistrement, sont sous la dépendance de signaux émis par les circuits de commande d'impression. Ces transferts sont effectués à raison d'un chiffre décimal par octet.

L'un des programmes mis au point transfère le contenu de la cassette sur un fichier du disque de l'ordinateur. Les données sont alors exploitées par divers programmes spécifiques : calcul de l'activité à saturation d'une solution de sulfate de manganèse irradiée par une source de neutrons soit par la méthode de circulation (croissance puis éventuellement décroissance de l'activité) soit par la méthode de décroissance, calcul du mouvement propre de l'ensemble de détection à partir des données enregistrées pendant la décroissance, sauvegarde des données sur cartes perforées.

Publications

Publications du BIPM (H. Moreau)

Depuis octobre 1976 ont été publiés :

- 1° *Comité Consultatif d'Électricité*, 14^e session (1975), avec 21 Annexes.
- 2° *Comité Consultatif des Unités*, 5^e session (1976), avec 6 Annexes.
- 3° *Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures*, tome 44 (65^e session, septembre 1976).
- 4° *Le Système International d'Unités (SI)*, 3^e édition (1977).
- 5° *Recueil de Travaux du Bureau International des Poids et Mesures*, volume 5 (1975-1976).

En février 1977, le BIPM a proposé à diverses bibliothèques des États membres de la Convention du Mètre des collections complètes ou partielles de ses publications depuis 1875. Quarante-trois bibliothèques et services métrologiques de vingt et un pays ont répondu à cette offre.

Publications extérieures

ALLISY (A.), Cours de Métrologie du Conservatoire National des Arts et Métiers, fascicule 3: Traitement de données expérimentales, 1977.

GRANVEAUD (M.) and AZOUBIB (J.), TAI frequency. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-25**, 1976, pp. 469-472.

CHARTIER (J.-M.), HELMCKE (J.) and WALLARD (A. J.), International intercomparison of the wavelength of iodine stabilized lasers. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-25**, 1976, pp. 450-453.

JOLLIFFE (B. W.), KRAMER (G.) and CHARTIER (J.-M.), Methane stabilized He-Ne laser intercomparisons 1976. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-25**, 1976, pp. 447-450.

CHARTIER (J.-M.) et AVRONS (D.), Comparaisons internationales de lasers He-Ne asservis sur l'iode. *PTB-Bericht Me-17*, 1977, pp. 133-138; Principes technologiques. *Ibid*, pp. 13-31.

GIACOMO (P.), La métrologie des longueurs et les lasers asservis sur l'iode. *PTB-Bericht Me-17*, 1977, pp. 9-11.

GIACOMO (P.), Mesures et incertitudes. *Bulletin OIML*, N° 65, pp. 20-27.

HUYNH (V. D.), International comparison of flux density measurements for monoenergetic fast neutrons. In « International Specialists Symposium on Neutron Standards and Applications », 28-31 mars 1977, Washington, D.C.

RYTZ (A.), International coherence of activity measurements (à paraître dans *International Journal of the Environment*, 1977).

An international neutron dosimetry intercomparison. *ICRU Report 27*. International Commission on Radiation Units and Measurements. Washington, D.C., 1978 (avec contributions de membres du BIPM).

TERRIEN (J.), News from the BIPM. *Metrologia*, **12**, 1976, pp. 85-86 et **13**, 1977, pp. 53-54.

TERRIEN (J.), Standards of length and time. *Reports on Progress in Physics*, **39**, 1976, pp. 1067-1108.

Rapports internes

Ces rapports peuvent être fournis sur demande.

— Temps d'arrivée de la première impulsion provenant d'une source décroissante, par J. W. Müller (Rapport BIPM-76/9, octobre 1976, 4 pages).

— Statistiques de comptage, par J. W. Müller (Rapport BIPM-76/10, octobre 1976, 7 pages).

— Mémento des sous-programmes BIPM, édition remise à jour et augmentée, par P. Carré et F. Lesueur (Rapport BIPM-76/11, novembre 1976, 31 pages).

— Conservation de l'ohm au BIPM (Rapport BIPM-76/12, juillet 1976, 1 page).

— Conservation du volt au BIPM (Rapport BIPM-76/13, juillet 1976, 1 page).

— Convertisseur de vitesse d'enregistrement, par P. Bréonce (Rapport BIPM-76/14, novembre 1976, 9 pages).

— Some relations between asymptotic results for dead-time-distorted processes. Part II: The variances, par J. W. Müller (Rapport BIPM-76/15 novembre 1976, 11 pages).

— Some remarks on dead-time losses of coincidences, par J. W. Müller (Rapport BIPM-76/16, décembre 1976, 14 pages).

— Asymptotic results for a modified renewal process and their application to counting distributions, par J. W. Müller (Rapport BIPM-77/1, janvier 1977, 18 pages).

— Sur la perte de coïncidences vraies par un temps mort cumulatif, par J. W. Müller (Rapport BIPM-77/2, février 1977, 4 pages).

— Coïncidences fortuites pour un temps mort cumulatif, par J. W. Müller (Rapport BIPM-77/3, mars 1977, 6 pages).

— Report on the international comparison of activity measurements of a solution of ^{139}Ce , par A. Rytz (Rapport BIPM-77/4, avril 1977, 70 pages).

— Évaluation de l'effet Gandy, par J. W. Müller (BIPM Working Party Note 207, avril 1977, 5 pages).

— Acquisition de données sur cassettes à bande magnétique, par P. Bréonce, P. Carré, L. Lafaye, F. Lesueur et C. Veyradier (Rapport BIPM-77/5, septembre 1977, 11 pages).

Certificats et Notes d'étude

Du 1^{er} octobre 1976 au 15 septembre 1977, 41 Certificats et 4 Notes d'étude ont été délivrés.

CERTIFICATS

1976

N°		
43.	Deux étalons de 1 Ω N ^{OS} 078564 et 078567 (addition)	Institut Métrologique Tchécoslovaque, Bratislava, Tchécoslovaquie.
44.	Etalon de 1 Ω N° 144487	Id.
45.	Deux étalons de 10000 Ω N ^{OS} 117720 et 148058	Id.
46.	Cinq calibres en acier de 125, 150, 175, 200 et 250 mm	Id.
47.	Cinq calibres en acier de 250, 300, 400, 500 et 1000 mm	Id.
48.	Six étalons secondaires d'intensité lumineuse (2853 K) N ^{OS} 242M, 243H, 243L, 119B, 119H et 119N	National Physical Research Laboratory, Prétoria, Afrique du Sud.
49.	Règle de 1 m N° 4795 en acier au nickel (addition)	Polski Komitet Normalizacji i Miar, Varsovie, Pologne.
50.	Cinq étalons secondaires d'intensité lumineuse (2353 K) N ^{OS} 5024, 5025, 5026, 5027 et 5028	Id.
51.	Cinq étalons secondaires d'intensité lumineuse (2853 K) N ^{OS} 20495, 20496, 20497, 20498 et 20499	Id.
52.	Cinq étalons secondaires de flux lumineux (2353 K) N ^{OS} TA4601C, TA4603C, TA4605C, TA4606C et TA4607C	Id.
53.	Cinq étalons secondaires de flux lumineux (2787 K) N ^{OS} TA21536C, TA21537C, TA21538C, TA21539C et TA21540C	Id.
54.	Thermomètre à résistance de platine N° 1833393	Van Swinden Laboratorium, 's-Gravenhage, Pays-Bas.
55.	Thermomètre à résistance de platine N° 1831376	Bureau Fédéral des Poids et Mesures, Wabern, Suisse.
56.	Thermomètre à résistance de platine N° 1831382	Id.
57.	Thermomètre à résistance de platine N° 488956	Institut National de Métrologie, Bucarest, Roumanie.

1977

N°

- | | | |
|-----|--|---|
| 1. | Règle de 1 m N° 46 en acier au nickel . | Institut National de Métrologie,
Bucarest, Roumanie. |
| 2. | Cinq étalons de force électromotrice
N ^{OS} 1345, 1373, 1376, 1377 et 1378 ... | Bureau Fédéral des Poids et Mesures,
Wabern, Suisse. |
| 3. | Trois étalons de 1 Ω N ^{OS} 1755134,
1758735 et 1758737 | Bureau Fédéral des Mesures et Métaux
Précieux, Belgrade, Yougoslavie. |
| 4. | Trois étalons de force électromotrice
N ^{OS} 1, 2 et 65048 | Id. |
| 5. | Quatre étalons de force électromotrice
N ^{OS} 1, 2, 3 et 4 | Id. |
| 6. | Quatre étalons de force électromotrice
N ^{OS} 1, 2, 3 et 4 (addition) | Det Norske Justervesen, Oslo,
Norvège. |
| 7. | Trois étalons de 1 Ω N ^{OS} 2398, 2399 et
2400 (addition) | Service de la Métrologie, Bruxelles,
Belgique. |
| 8. | Neuf calibres en acier de 5, 15, 25,
40, 50, 60, 75, 90 et 100 mm | Bureau Fédéral des Poids et Mesures,
Wabern, Suisse. |
| 9. | Six étalons de force électromotrice
N ^{OS} 66087, 66091, 66132, 67045 et
67049 (addition) | Van Swinden Laboratorium,
's-Gravenhage, Pays-Bas. |
| 10. | Quatre étalons de force électromotrice
N ^{OS} 35403, 35405, 35633 et 35668
(addition) | Id. |
| 11. | Trois étalons de 1 Ω N ^{OS} 1753639,
1753641 et 1756653 (addition) | Id. |
| 12. | Etalon de 1 Ω N° 1773191 | Id. |
| 13. | Deux étalons de 10000 Ω N ^{OS} 851015 et
851036 (addition) | Id. |
| 14. | Six calibres en acier de 1, 5, 10, 20,
50, 100 mm | Laboratoire National d'Essais,
Paris, France. |
| 15. | Kilogramme prototype N° 2 (addition) .. | Roumanie. |
| 16. | Kilogramme en bronze blanc N° 8
(addition) | Institut National de Métrologie,
Bucarest, Roumanie. |
| 17. | Masse de 1 g en laiton doré (addition) | Id. |
| 18. | Quatre étalons de force électromotrice
N ^{OS} 5619, 5644, 5659 et 5964 | Office National des Mesures,
Budapest, Hongrie. |
| 19. | Etalon de 1 Ω N° 1617922 (addition) ... | Société Anonyme Belge de Constructions
Aéronautiques, Bruxelles, Belgique. |
| 20. | Etalon de 0,1 Ω N° 134899MF01
(addition) | Id. |
| 21. | Deux étalons de force électromotrice
N ^{OS} 378322 et 378351 (addition) | Id. |
| 22. | Deux étalons de force électromotrice
N ^{OS} 6337 et 6357 | Id. |
| 23. | Etalon de 1 Ω N° 1624034 (addition) ... | Bureau Fédéral des Poids et Mesures,
Wabern, Suisse. |

1977 (suite)

N°		
24.	Etalon de 1 Ω N° 1844266	Bureau Fédéral des Poids et Mesures, Wabern, Suisse.
25.	Deux thermocouples N° ^{OS} A et B (addition)	Van Swinden Laboratorium, Amsterdam-Gravenhage, Pays-Bas.
26.	Deux thermocouples platine/platine rhodié N° ^{OS} E et F	Id.

NOTES D'ÉTUDE

1976

3.	Thermocouple platine/platine rhodié N° 124PTB70	Institut National de Métrologie, Bucarest, Roumanie.
4.	Thermomètre à résistance de platine N° 489865	Id.

1977

1.	Thermomètre Prolabo N° 318	VNIIMS, Moscou, U.R.S.S.
2.	Deux thermomètres Prolabo N° ^{OS} 304 et 305, (position du point zéro) (addition)	Société Anonyme Belge de Constructions Aéronautiques, Bruxelles, Belgique.

IV. — ACTIVITÉS ET RELATIONS EXTÉRIEURES

Documentation; Système International d'Unités (H. Moreau)

Les demandes de renseignements sur les unités de mesure en général représentent toujours une activité non négligeable.

En ce qui concerne le SI, la 3^e édition de la brochure du BIPM, publiée en 1977, a fait l'objet de traductions en langue anglaise (par le NBS, Washington et par le NPL, Teddington) et en langue allemande (conjointement par l'ASMW, Berlin, le BEV, Vienne, le BIFPM, Berne et la PTB, Braunschweig).

Le BIPM continue à suivre avec intérêt les progrès du SI dans les pays métriques et dans ceux où la conversion métrique se poursuit. Trois nouvelles organisations internationales, l'Union Géodésique et Géophysique Internationale, la Fédération Internationale de Chimie Clinique (IFCC) et l'Organisation Mondiale de la Santé, viennent de recommander l'emploi de ce système. De son côté, le Conseil des Communautés Européennes a fixé, par sa directive du 27 juillet 1976, des dates pour l'élimination des unités en dehors du SI et l'adoption complète du SI par ses États membres.

Travaux en liaison avec des organismes internationaux et nationaux (Voir aussi Voyages, visites, conférences, exposés du personnel)

La participation du BIPM aux travaux de diverses organisations internationales et françaises se poursuit comme les années précédentes. Dans

ce domaine, on doit mentionner la reprise des activités du Comité Technique 1.1 (Terminologie) de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE); ce Comité, dont le président est J. Terrien et le secrétaire H. Moreau, est chargé de préparer la 4^e édition du Vocabulaire International de l'Éclairage.

J. Terrien a participé, du 6 au 12 octobre 1976 à la Cinquième Conférence Internationale de Métrologie Légale, à Paris. Le 29 mars 1977, il a fait une conférence sur les étalons internationaux à l'ouverture des Journées Nationales de la Qualité 1977, à Paris. Le 4 avril 1977, il a participé à la réunion du Secrétariat-Pilote 22 (Principes généraux de la vérification des instruments de mesurage) de l'Organisation Internationale de Métrologie Légale, à Paris.

P. Giacomo et A. Allisy ont participé, le 18 mars 1977, à une réunion, organisée par le BIML, sur l'enseignement de la métrologie.

Du 4 au 8 avril 1977, A. Allisy a participé à la réunion au BIPM du comité « Quantities and Units » de l'ICRU.

Enfin, plusieurs membres du personnel (J. Terrien, P. Giacomo, A. Allisy, G. Leclerc, J. Bonhoure) participent régulièrement aux réunions soit du Comité de direction soit de divers Groupes de travail du Bureau National de Métrologie français.

Voyages, visites, conférences, exposés du personnel

Dans ce qui suit, le signe++ ou+ indique un déplacement effectué sur invitation d'un organisme international, national ou privé, et dont les frais ont été pris en charge par cet organisme, totalement (++) ou partiellement (+).

Le directeur du BIPM a effectué les voyages suivants :

— du 16 au 21 mai 1977, il a participé à la réunion du Club de Métrologie de l'Europe de l'Ouest à Turin++, et s'est entretenu avec le président du CIPM J. V. Dunworth et les directeurs de plusieurs laboratoires de diverses questions intéressant le BIPM. Il a visité à cette occasion l'IMGC et l'IEN (à Turin) ainsi que le laboratoire de la Communauté européenne de l'énergie atomique à Ispra (Italie);

— les 25 et 26 juillet 1977, il a participé au Conseil d'Administration de la Commission Internationale de l'Éclairage à Eindhoven (Pays-Bas) et visité une partie des laboratoires Philips;

— du 5 au 9 septembre 1977, il a participé, avec P. Giacomo, G. Leclerc, T. Witt et D. Reymann à la « European Conference on Precise Electrical Measurements » (EUROMEAS 77), à l'Université du Sussex. J. Terrien et P. Giacomo ont donné deux conférences d'ouverture, G. Leclerc et T. Witt une communication sur « The conservation and the dissemination of the volt by the BIPM since 1932 », T. Witt et D. Reymann une communication sur « The BIPM Josephson effect voltage standard ».

P. Giacomo a effectué les déplacements suivants :

— le 7 février 1977, avec J.-M. Chartier, il a visité le Laboratoire de Physique des lasers de l'Université de Paris Nord, à Villetaneuse;

— les 10 et 11 février 1977, il a participé, avec J.-M. Chartier, à une réunion « Lasers asservis sur l'iode », à la PTB (Braunschweig). Il a pro-

noncé la conférence d'ouverture « Lasers et mesures de longueur » et J.-M. Chartier a donné deux exposés sur « Comparaisons internationales de lasers à He-Ne stabilisés sur l'iode » et « Principes technologiques »;

— les 16 et 17 février 1977, il a donné une conférence sur « Le SI » aux journées de perfectionnement « La mesure dans l'industrie du gaz » organisées à Paris par l'Association technique de l'industrie du gaz en France. Lors de ces mêmes journées de perfectionnement, A. Allisy a fait une conférence sur la mesure des grandeurs physiques;

— du 26 juin au 10 juillet 1977, il s'est rendu aux États-Unis d'Amérique pour visiter les laboratoires du NBS à Gaithersburg et à Boulder, puis participer à la « Third International Conference on Laser Spectroscopy (TICOLS) », à Jackson, où il a animé une table ronde sur « Mesure des longueurs d'onde de lasers ».

A. Allisy a participé aux réunions suivantes :

— du 13 au 18 octobre 1976 : « ICRU Committee on average energy required to produce an ion pair » à l'Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois (États-Unis d'Amérique)++;

— les 2 et 3 novembre 1976 : réunion de travail du groupe « Heat transfer » du Club de Métrologie de l'Europe de l'Ouest, au NPL, Teddington++;

— du 16 au 18 mai 1977 : réunion du Club de Métrologie de l'Europe de l'Ouest à Turin++;

— les 23 et 24 juin 1977 : « ICRU Committee on Stopping Powers », au NBS (Gaithersburg)++;

— le 22 juin, il en a profité, en tant que représentant de l'ICRU, pour prendre contact avec l'Union Radioscopique Internationale (URSI) et discuter des possibilités de créer un ensemble commun de grandeurs physiques.

A. Rytz a participé, du 4 au 6 octobre 1976 à Paris, au Séminaire sur « Low-level measurement techniques » organisé par le groupe de travail du même nom de l'International Committee for Radionuclide Metrology (ICRM), où il a présenté un exposé (voir *Publications extérieures*). A la suite de cette réunion, il a visité le laboratoire de métrologie de la radioactivité à faible niveau qui fait partie du Laboratoire de Métrologie des Rayonnements Ionisants, Saclay, mais se trouve à Paris.

Il a en outre pris part à la réunion annuelle de l'ICRM, le 13 juin 1977 à Paris.

Du 28 au 30 septembre 1977, il s'est rendu à la PTB (Braunschweig)++ pour une visite de la section de Physique Atomique où il a présenté un exposé intitulé « Erfahrungen mit dem internationalen Referenzsystem für Aktivitätsmessungen von γ -Strahlen emittierenden Nukliden ».

A. Sakuma a présenté un exposé sur « la gravimétrie au BIPM » au Comité National français de Géodésie et Géophysique, le 1^{er} février 1977.

Il s'est rendu au Japon+ du 7 au 30 avril, du 12 mai au 4 juin, du 10 au 27 juillet et du 5 au 31 août 1977, notamment pour diriger les travaux d'installation du gravimètre absolu de l'International Latitude Observatory, Mizusawa. Le 26 avril, il a rencontré Mr Chyô (Président de la Chyô Balance Co, Kyoto) qui lui a promis de collaborer à la réparation

ou à la remise en état des balances des laboratoires de métrologie (question discutée lors de la réunion concernant les masses, BIPM, novembre 1976) et lui a annoncé la visite prochaine au BIPM d'un ingénieur de sa Société. Le 28 avril, il a visité l'Institut de Mécanique de Précision, Tokyo (Directeur Y. Tomonaga) et a eu un entretien avec un ingénieur de la Société Tsugami pour étudier la méthode de remise en état de l'interféromètre Tsugami du BIPM. Il a eu plusieurs entretiens techniques avec les responsables de la gravimétrie du Geographical Survey Institute (Tokyo) qui ont manifesté leur désir d'acquérir un gravimètre absolu transportable BIPM-IMGC.

J. Bonhoure a participé aux travaux de deux comités techniques de la Commission Internationale de l'Éclairage : les 12 et 13 septembre 1977 à Berlin (TC-1.2, Photométrie et Radiométrie), les 15 et 16 septembre à Budapest (TC-2.2, Détecteurs).

J. W. Müller a été invité à l'Institut d'électrochimie et radiochimie de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse)⁺⁺ du 23 au 26 mai 1977, où il a fait une conférence intitulée « Quand arrivent les impulsions aléatoires? ».

T. Witt et D. Reymann se sont rendus au LCIE le 11 janvier (visite de l'installation Josephson) et le 27 janvier 1977 (« demi-journée d'étude sur la métrologie du volt », au cours de laquelle T. Witt a donné une conférence intitulée « Conservation du volt par l'effet Josephson. État d'avancement des travaux sur le plan international. Perspectives d'avenir ») et D. Reymann a fait un exposé sur les problèmes relatifs aux comparaisons des réalisations du volt).

T. Witt a donné un cours sur la métrologie électrique à l'Institut d'Électronique Fondamentale de l'Université de Paris XI (Orsay), en avril et mai 1977.

A l'occasion de la conférence EUROMEAS, il a visité, le 1^{er} et le 2 septembre 1977, les laboratoires du NPL spécialisés dans la conservation du volt et l'effet Josephson.

V. D. Huynh s'est rendu au NBS (Gaithersburg)

— du 1^{er} au 15 décembre 1976⁺⁺ pour effectuer les mesures comparatives de débit de fluence de neutrons rapides;

— du 27 mars au 1^{er} avril 1977 pour participer à la conférence « International Specialists Symposium on Neutron Standards and Applications ».

G. Girard a participé, du 13 au 15 août 1977, à Varsovie, aux réunions de la Commission I.4 (Physicochemical Measurements and Standards) et assisté à celles de la Sous-Commission I.4.1 (Calibration and Tests Materials) de l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée; il a rendu compte de l'état actuel d'avancement des travaux entrepris dans plusieurs grands laboratoires nationaux, en vue d'une nouvelle détermination de la masse volumique de l'eau.

J.-M. Chartier s'est rendu au LHA (Orsay), le 28 mars 1977, dans le cadre de la collaboration avec ce laboratoire, à la suite du remplissage d'une cuve à méthane par P. Cézé.

D. Reymann a fait un stage au NPL du 22 août au 2 septembre 1977. Il a étudié le comparateur cryogénique de tensions et les techniques de couplage par « lignes à bande » et il a participé à la fabrication de jonctions Josephson en alliage de plomb.

J. Azoubib a assisté, du 30 novembre au 2 décembre 1976, au huitième « Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting » à Washington, D.C. (États-Unis d'Amérique).

Il s'est rendu au Royal Greenwich Observatory et au NPL (Grande-Bretagne) du 26 au 28 janvier 1977 pour effectuer une comparaison de temps par transport d'horloge.

R. Felder a fait un stage au Laboratoire de Physique des lasers de l'Université de Paris Nord, à Villetaneuse, du 4 au 21 mars 1977. Il a participé à des mesures de stabilité de lasers à argon stabilisés sur l'iode ($\lambda = 514,5$ nm).

Visites et stages au BIPM

Plusieurs visites ont été organisées pour des groupes de chercheurs, ingénieurs ou étudiants. Un effort particulier a été fait pour accueillir des groupes de professeurs ou de futurs enseignants. Parmi les nombreux visiteurs, physiciens ou métrologistes, nous ne citerons que ceux qui sont particulièrement concernés par les travaux du BIPM.

Mlle M.-T. Niatel et Mme M. Boutillon (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale, Paris) et Mlle A.-M. Roux (Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants, Paris) poursuivent leur participation au travail du groupe des rayons X et γ de la section des rayonnements ionisants.

Mr R. Felder (INM, Paris) a poursuivi dans la section des lasers un stage de longue durée, commencé en janvier 1974, jusqu'à la date de son engagement au BIPM, le 1^{er} février 1977.

Nous maintenons des relations suivies avec MM. P. Cérez et A. Brillet (LHA, Orsay), J. Jimenez (LPTF, Paris), G. Camy (Laboratoire de Physique des lasers, Villetaneuse). Ils nous ont rendu visite à plusieurs reprises; une comparaison de lasers asservis sur l'iode et de lasers asservis sur le méthane, entre le LPTF et le BIPM, est envisagée pour la fin de 1977.

Des informations et renseignements techniques sur la construction et le fonctionnement des lasers asservis ont été fournis à plusieurs personnes, notamment Mr S. Hadjucovic (Bureau Fédéral des Mesures et Métaux précieux, Yougoslavie), Mr C. J. Van der Hoeven (NPRL, Afrique du Sud), Mr A. Janest (INM, France), Mr F. Tiscareño (États-Unis d'Amérique).

Mlle M. L. Du Preez (NPRL, Pretoria) a participé, du 21 septembre au 5 octobre 1976, à la comparaison indirecte de l'étalon d'exposition de son laboratoire avec l'étalon du BIPM (rayons X d'énergie moyenne) et à l'étalonnage d'une chambre d'ionisation pour les rayons X de faible énergie. Elle a visité plusieurs autres sections du BIPM le 4 octobre.

Mr S. Spiridonovic, Directeur-Adjoint du Bureau Fédéral des Mesures et Métaux précieux de Yougoslavie, est venu au BIPM le 6 octobre 1976. Il a visité la section des masses; il a discuté avec nous des meilleurs moyens

à mettre en œuvre pour conserver les unités de résistance et de force électromotrice et il s'est informé de l'aide que le BIPM pourrait apporter à son laboratoire dans ce but. A la suite de cette visite, deux physiciens yougoslaves, MM. S. Slobodan et V. Radenkovic, ont passé quelques jours au BIPM entre le 20 et le 23 décembre.

Mr I. W. Goodier (NPL, Teddington) a visité, le 8 octobre 1976, la section des rayonnements ionisants pour discuter des problèmes d'actualité.

Mr Carlsson (Service des Poids et Mesures, Suède) a visité la section des masses le 12 octobre 1976, de même que Mr Tuinder (Service de la Métrologie des Pays-Bas), le 13 octobre.

Mr P. Pákay (OMH, Hongrie) a visité plusieurs sections le 8 novembre 1976.

Mr Cisak (Institut de Géodésie et Cartographie, Varsovie) a séjourné au BIPM du 15 au 26 novembre 1976, à l'occasion de l'étude de la règle divisée N° 4795 dont il a assuré le transport; il a participé à plusieurs séries de mesures.

Mr Kraznov (IMM, Leningrad) a discuté avec nous, le 30 novembre 1976, de l'effet Josephson et de la conservation des étalons de force électromotrice.

Mr G. Jung (Institut de Physique, Académie des Sciences polonaise) a eu avec nous, le 7 décembre 1976, un échange de vues sur les propriétés des jonctions Josephson en hyperfréquences.

Mr Perrochet (Bureau Fédéral des Poids et Mesures, Suisse) a séjourné au BIPM les 8 et 9 décembre 1976 pour discuter de problèmes de thermométrie. Il en a profité pour se renseigner sur la construction des lasers à iode et pour visiter la section des masses.

Mr P. Warnecke (PTB) s'est entretenu avec nous le 15 décembre 1976 de la conservation des étalons de force électromotrice et des comparateurs cryogéniques de tensions.

Profitant de leur passage au BIPM à l'occasion du transport d'étalons électriques, plusieurs spécialistes ont visité la section d'électricité; citons MM. P. Wallin (Centre de Recherche technique de Finlande, le 23 décembre 1976), Angelino et G. Rua (IEN, le 18 janvier 1977), O. Piller (Bureau Fédéral des Poids et Mesures, Suisse, le 24 janvier 1977).

MM. G. Cerutti, L. Cannizzo (IMGC, Turin) et I. Marson (Istituto di Miniere e Geofisica Applicata, Trieste) ont séjourné au BIPM du 18 au 27 janvier et du 25 février au 2 mars 1977 pour effectuer la révision et l'étalonnage du gravimètre absolu transportable; ils étaient accompagnés de Mr F. Alasia (IMGC) lors de leur premier séjour et de Mr A. Mangano (IMGC) lors du second.

Mr S. R. Domen (NBS) ainsi que MM. A. Ostrowsky et K. Steinschaden (LMRI, Saclay) sont venus comparer leurs étalons calorimétriques de dose absorbée dans le graphite avec l'étalon ionométrique du BIPM (rayonnement γ du ^{60}Co), respectivement du 28 janvier au 16 février et du 21 février au 11 mars 1977.

Mr J. Ahrens (Institut de Chimie Max Planck, Mayence) a discuté, les 1^{er} et 2 février 1977, des problèmes de perte de comptages et de mesure absolue d'énergie de particules alpha.

MM. P. Salvadori, E. Casnati et M. L. Pugliani sont venus, du 14 au 18 février 1977, étalonner, pour les rayons X d'énergie moyenne, la chambre d'ionisation de l'Istituto Superiore di Sanità (Rome).

MM. G. C. Lowenthal (Australian Atomic Energy Commission, Sydney)

et A. Spagnol (Geel), séjournant tous les deux temporairement au LMRI, Saclay, nous ont rendu visite le 16 février 1977 pour échange d'informations sur la mesure des radionucléides.

Mr Z. Referowski (Polski Komitet Normalizacji i Miar, Varsovie) est venu discuter le 18 février 1977, des résultats de ses nouvelles mesures d'ionisation dans l'air humide.

Mr B. Szabo (U.S. Air Force, Cambridge, Massachusetts), responsable de la gravimétrie aux États-Unis, a discuté avec nous, le 25 février 1977, du projet de transporter le gravimètre absolu BIPM-IMGC pour l'étalonnage du réseau gravimétrique des États-Unis d'Amérique.

Mr Slanar (BEV, Autriche) a visité la section des masses le 2 mars 1977.

Mr O. Mathiesen (Statens Provningsanstalt, Suède) a visité les sections des masses et des lasers le 3 mars 1977.

Mr C. Ballaux (Centre d'Études de l'Énergie Nucléaire, Mol, Belgique) a fait un stage du 7 au 11 mars 1977 pour étudier la préparation des sources radioactives et discuter des problèmes de la mesure par comptage des coïncidences. Il a emporté avec lui douze sources de divers radionucléides. Il a visité plusieurs autres sections du BIPM (masses, longueurs) le 11 mars.

Le 13 mars 1977, un ingénieur de la Société Chyô (Japon) est venu voir nos balances, à la suite de contacts établis par A. Sakuma; nous espérons que cette Société pourra prendre en charge la révision de notre balance Rueprecht de 1 kg, et aussi de celles de 50 g et 20 g.

Mr R. Mutabzija (Institut « Ruder Bošković », Zagreb) a visité notre installation Josephson le 7 avril 1977; il a fait une visite générale du BIPM le 8 avril.

Mr T. Finnegan (NBS) a visité notre installation Josephson, le 19 avril 1977, et discuté avec nous de la fabrication des jonctions.

Mr Zago (École Nationale Supérieure de l'Aéronautique, Toulouse) a visité cette même installation le 22 avril 1977.

Mr G. Bengtsson (National Institute of Radiation Protection, Stockholm) a apporté deux chambres de transfert, le 25 avril 1977, pour un contrôle de leur étalonnage (rayonnement γ du ^{60}Co).

Mr J. Ludmer (Israël) a visité la section des masses le 26 avril 1977.

Mr S. Wagner (PTB, Braunschweig) a visité la section des rayonnements ionisants le 27 avril 1977.

Mr Avril (École Nationale Supérieure de l'Aéronautique, Toulouse) a discuté avec nous de l'effet Josephson les 28 et 29 avril; il a, en outre, visité la section des lasers. Les 12 et 13 mai, MM. Avril, Zago et Jouve, de cette même École, ont assisté à une série de mesures de l'effet Josephson; nous leur avons donné une dizaine de jonctions.

Mr Chang Ki-Jung (Corée) a visité diverses sections le 6 mai 1977: masses, gravimétrie, longueurs, thermométrie, électricité.

Mr H. Ramthun (PTB, Braunschweig) a visité la section des rayonnements ionisants le 9 mai 1977 et a emporté les publications du BIPM dont il avait fait la demande préalable.

Mr H. Yano (Chef de la section « Measuring System », NRLM, Japon) a fait une visite détaillée de notre section des masses le 16 mai 1977; il a aussi visité nos sections des longueurs et de gravimétrie et discuté avec nous du calcul des incertitudes.

Mr Dj. Bek-Uzarov (Institut Boris Kidrič, Belgrade) a visité nos sections des longueurs, de gravimétrie et des rayonnements ionisants le 17 juin 1977.

Un groupe d'ingénieurs de Pékin (Rép. Pop. de Chine) a visité nos laboratoires le 20 juin 1977 en s'intéressant plus spécialement au problème du conditionnement d'air.

Mr J. A. Hammond (U.S. Air Force, Cambridge, Massachusetts) et Mr J. E. Faller (JILA, Boulder) se sont intéressés aux mesures gravimétriques et aux lasers à fréquence décalée, respectivement le 28 et le 30 juin 1977.

Mr E. G. Thwaite (NML, Australie) s'est entretenu avec nous, le 4 juillet 1977, des comparaisons internationales de mesure de règles divisées en cours et a visité nos sections des longueurs, de gravimétrie et des lasers.

Mr H. Yoda (professeur au Nagoya Institute of Technology, Meijo University, Japon), accompagné de quinze directeurs techniques, a visité les sections des longueurs, des masses et de gravimétrie, le 6 juillet 1977.

Mr Bloembergen (VSL, Pays-Bas) a visité notre section de thermométrie les 26 et 27 juillet 1977.

Mr C. J. Harmans (VSL, Pays-Bas) a visité notre installation Josephson les 28 et 29 juillet 1977. Nous lui avons remis sept supports portant une douzaine de jonctions.

MM. Y. D. Boulanger, S. N. Chtcheglov (Institut de Physique du Globe, Moscou), G. P. Arnautov, E. N. Kalish, I. F. Stus et V. G. Tarasük (Institut d'Automatisme et d'Électrométrie, Novosibirsk) ont séjourné au BIPM du 7 au 28 septembre 1977 pour effectuer une mesure de g par la méthode de la chute libre, avec un gravimètre absolu construit à Novosibirsk.

Mr R. F. Laitano (Centro di Studi Nucleari della Casaccia, Italie) a fait un stage du 12 au 16 septembre 1977 pour se familiariser avec les techniques de préparation et de comptage de sources radioactives.

V. — 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 1976.

Compte I. — Fonds ordinaires

RECETTES		francs-or
ACTIF AU 1 ^{er} JANVIER 1976		5 455 315,24
Recettes budgétaires.....	4 113 904,20	} 4 147 054,20
Prélèvement sur le compte « Remboursement aux États ».....	33 150,00	
Total		<u>9 602 369,44</u>

DÉPENSES		francs-or
Dépenses budgétaires	4 272 672,28	4 297 982,60
Différences de change	25 310,32	} 5 304 386,84
ACTIF AU 31 DÉCEMBRE 1976		
Total		<u>9 602 369,44</u>

La comparaison de l'actif au 31 décembre 1976 avec l'actif au 1^{er} janvier 1976 fait apparaître une diminution de la réserve de trésorerie de 150 928,40 francs-or.

DÉTAIL DES RECETTES BUDGÉTAIRES.

Versements de contributions :

	francs-or
au titre de l'exercice 1976	3 215 428
au titre des exercices antérieurs.....	204 417
au titre de l'exercice 1977	111 632
	} 3 531 477,00
Intérêts des fonds	332 654,46
Taxes de vérification	2 930,79
Remboursements des taxes sur les achats.....	153 431,62
Recettes diverses	93 410,33
Total	<u>4 113 904,20</u>

DÉTAIL DES DÉPENSES BUDGÉTAIRES

Chapitres	Dépenses de l'exercice	Prévisions budgétaires	Économies	Dépassements
	francs-or	francs-or	francs-or	francs-or
A. Dépenses de personnel :				
1. Traitements	2 229 557,74	2 107 000	—	122 557,74
2. Allocations familiales	135 344,00	120 000	—	15 344,00
3. Sécurité sociale	133 866,00	137 000	3 134,00	—
4. Assurance-accidents	21 809,00	21 000	—	809,00
5. Caisse de Retraites	300 000,00	300 000	—	—
B. Dépenses de fonctionnement :				
1. Bâtiments	150 593,86	185 000	34 406,14	—
2. Mobilier	8 025,33	7 000	—	1 025,33
3. Laboratoires et ateliers	412 857,92	570 000	157 142,08	—
4. Chauffage, eau, énergie électrique	98 151,43	130 000	31 848,57	—
5. Assurances	14 096,05	15 000	—	1 096,05
6. Impressions et publications	85 029,08	60 000	—	25 029,08
7. Frais de bureau	53 469,23	60 500	7 030,77	—
8. Voyages	60 719,17	50 000	—	10 719,17
9. Bureau du Comité	9 666,67	14 500	4 833,33	—
C. Dépenses d'investissement :				
1. Laboratoires	390 560,61	550 000	159 439,39	—
2. Atelier de mécanique	18 867,82	15 000	—	3 867,82
3. Atelier d'électronique	47 512,73	60 000	12 487,27	—
4. Bibliothèque	16 674,65	35 000	18 325,35	—
D. Frais divers et imprévus :	44 718,09	235 000	190 281,91	—
E. Utilisation de monnaies non convertibles	41 152,90	150 000	108 847,10	—
Totaux	4 272 672,28	4 820 000	727 775,91	180 448,19
Pour mémoire :				
F. Ajustement de la Réserve de Trésorerie		150 000		
Total		4 970 000		

Compte II. — Caisse de retraites

RECETTES	
	francs-or
ACTIF AU 1 ^{er} JANVIER 1976	855 396,40
Intérêts des fonds	67 529,81
Retenues sur les traitements	116 680,41
Virement du Compte I	300 000,00
Total	<u>1 339 606,62</u>

DÉPENSES	
	francs-or
Pensions servies	243 312,95
ACTIF AU 31 DÉCEMBRE 1976	1 096 293,67
Total	<u>1 339 606,62</u>

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

RECETTES	
	francs-or
ACTIF AU 1 ^{er} JANVIER 1976	39 465,59
Contribution d'entrée de l'Iran	20 900,00
Total	<u>60 365,59</u>

DÉPENSES	
	francs-or
Investissement : achat d'un ordinateur (14 décembre 1976)	60 365,59
ACTIF AU 31 DÉCEMBRE 1976	0,00
Total	<u>60 365,59</u>

Compte IV. — Caisse de prêts sociaux

RECETTES	
	francs-or
ACTIF AU 1 ^{er} JANVIER 1976	10 811,45
Virement budgétaire (9 581 FF)	5 280,18
Amortissements partiels des prêts (74 808,25 FF)	41 227,57
Total	<u>57 319,20</u>

DÉPENSES	
	francs-or
Prêts consentis (46 000 FF)	25 351,05
ACTIF AU 31 DÉCEMBRE 1976	31 968,15
Total	<u>57 319,20</u>

BILAN

AU 31 DÉCEMBRE 1976

	francs-or
Compte I « Fonds ordinaires »	5 304 386,84
Compte II « Caisse de retraites »	1 096 293,67
Compte III « Fonds spécial pour l'amélioration du matériel scientifique »	0,00
Compte IV « Caisse de prêts sociaux »	31 968,15
	<hr/>
ACTIF NET	6 432 648,66
	<hr/> <hr/>

Cet actif se décompose comme suit :

a. Fonds déposés en Banque :

	francs-or
1° En monnaie française	991 816,92
2° » U.S.A.	4 039 701,83
3° » suisse	319 641,61
4° » britannique	2,99
5° » allemande	956 474,18
6° » hongroise	11 434,57
7° » polonaise	98 453,99
b. Espèces en caisse	15 122,57
	<hr/>
ACTIF NET	6 432 648,66
	<hr/> <hr/>

—————

RAPPORT
DU
COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE
(8^e Session — 1977)

AU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

par B. GUINOT, Rapporteur

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS) a tenu sa 8^e session au Bureau International des Poids et Mesures, à Sèvres, au cours de deux séances, les mardi 26 et mercredi 27 avril 1977.

Étaient présents :

J.V. DUNWORTH, président du CIPM, président du CCDS.

Les délégués des laboratoires et organisations membres :

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung
[ASMW], Berlin (M. KALAU).

Bureau International de l'Heure [BIH], Paris
(B. GUINOT).

Bureau des Longitudes, Paris (B. DECAUX).

Commission Nationale de l'Heure [CNH], Paris
(B. GUINOT).

Conseil National de Recherches [NRC], Ottawa
(C.C. COSTAIN).

Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques [IMPR], Moscou (S.B. POUCHKINE, V. SAGINE).

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris
[IEN], Turin (S. LESCHIUTTA).

Laboratoire de l'Horloge Atomique du CNRS, Université de Paris-Sud, Orsay (C. AUDOIN).

National Bureau of Standards [NBS], Boulder (J.A. BARNES, H. HELLWIG).
National Physical Laboratory [NPL], Teddington (A.E. BAILEY).
Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig (G. BECKER).
Royal Greenwich Observatory [RGO], Hailsham (J.D.H. PILKINGTON, H.M. SMITH).
Union Astronomique Internationale [UAI], W. MARKOWITZ).
U.S. Naval Observatory [USNO], Washington (G.M.R. WINKLER).

Les membres nominativement désignés :

J. BONANOMI, Directeur de l'Observatoire de Neuchâtel.
A. ORTE, sous-directeur de l'Instituto y Observatorio de Marina, San Fernando.

Le directeur du BIPM (J. TERRIEN).

Assistaient aussi à la session : P. GIACOMO, sous-directeur du BIPM, J. AZOUBIB et P. CARRÉ (BIPM), M. GRANVEAUD (BIH).

Excusés : Comité Consultatif International des Radiocommunications de l'Union Internationale des Télécommunications, Genève ; Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères, Neuchâtel ; National Research Laboratory of Metrology, Tokyo ; Radio Research Laboratories, Tokyo.

Absent : U.S. Coast Guard, Washington.

Après les souhaits de bienvenue de Mr Terrien et du Président, la séance est ouverte.

Avec l'approbation du Comité Consultatif, le Président confie la tâche de rapporteur à Mr Guinot. Il indique les points essentiels que le CCDS aura à considérer : le "pilotage" de la fréquence du TAI, les progrès des horloges, les corrections relativistes, l'utilisation des satellites pour comparer les horloges. Il passe ensuite au premier point de l'ordre du jour.

1. PROGRÈS DES ÉTALONS ATOMIQUES DE FRÉQUENCE
ET DES HORLOGES ATOMIQUES

Mr *Barnes* et Mr *Hellwig* présentent les étalons de fréquence du National Bureau of Standards. L'étalon à jet de césium NBS-4, employé depuis 1973, fonctionne d'une façon quasi continue depuis juillet 1975 et est devenu l'une des horloges qui contribuent à l'établissement de TA(NBS) ; son exactitude est de l'ordre de 3×10^{-13} (1 σ). Il est cependant déconseillé d'utiliser ses données pour étalonner la fréquence du TAI. L'étalon à jet de césium NBS-6 résulte d'une transformation de NBS-5 ; il fonctionne depuis octobre 1976 et il réalise la seconde avec une exactitude de 9×10^{-14} (1 σ). Il semble que les étalons à césium puissent être encore améliorés.

Le NBS a construit un étalon passif à hydrogène dont la stabilité surpasse celle de toutes les horloges présentes. Il continue l'étude de dispositifs fonctionnant dans l'infrarouge et le visible et des chaînes qui permettent de les utiliser comme étalons de temps.

Mr *Costain* estime qu'un étalon à césium peut servir à la fois d'horloge et d'étalon primaire. Ainsi, l'étalon NRC CsV du Conseil National de Recherches fonctionne d'une façon continue depuis mai 1975, tout en assurant une exactitude de 5×10^{-14} . L'exactitude est maintenue par des réévaluations totales qui ont lieu environ deux fois par an et par des réévaluations partielles. Il faut remarquer que les réévaluations dégradent momentanément la qualité des étalons, ce qui justifie leur fonctionnement prolongé, et que la publication régulière des résultats exigée par le fonctionnement en horloge est une garantie de l'intégrité des résultats.

Le NRC a entrepris de construire trois nouveaux étalons à jet de césium destinés à établir TA(NRC), étalons qui doivent être plus stables et plus économiques que les étalons commerciaux.

En dépit des qualités de NRC CsV, Mr *Costain* estime qu'il n'est pas recommandable de lui donner un poids supérieur à celui des horloges commerciales dans le calcul du TAI, tant que de nouvelles méthodes de comparaison de temps

n'apporteront pas une précision améliorée.

Une discussion s'ouvre entre MM. Costain, Hellwig, Becker et Winkler à propos de l'indépendance statistique des réalisations successives de la seconde. Bien que Mr *Becker* ait admis la notion de cohérence entre les étalonnages, il n'approuve pas la notion d'erreur systématique constante. Des réévaluations partielles peuvent avoir lieu avec des périodicités différentes et, de plus, des changements progressifs des composants des étalons peuvent contribuer à une dérive de fréquence.

Mr *Leschiutta* fait état des travaux poursuivis à l'Istituto Elettrotecnico Nazionale sur les étalons à jet de magnésium ou de calcium. Un second dispositif à magnésium a été construit ; mais la puissance disponible à la sortie de la chaîne de multiplication de fréquence n'est pas suffisante pour la spectrométrie dans la région submillimétrique. Les travaux portent actuellement sur l'accroissement de cette puissance.

Mr *Kalau* indique que le Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung a entrepris de construire un étalon à jet de césium.

Mr *Becker* mentionne les améliorations apportées à l'étalon à jet de césium CS1 de la Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Lorsque toutes les incertitudes connues sont prises en compte, l'exactitude est de $0,26 \times 10^{-13}$, mais il faut aussi estimer le rôle des imperfections des dispositifs réels et l'exactitude estimée d'une manière réaliste est de 1×10^{-13} . Pour les raisons indiquées précédemment, Mr *Becker* ne distingue plus les erreurs systématiques et les erreurs aléatoires. Les résultats des étalonnages de TA(PTB) sont envoyés au BIH dès qu'ils sont obtenus, avec une incertitude globale. A ce propos, Mr *Becker* fait remarquer que les incertitudes des liaisons horaires par LORAN-C qui conduisent à des ajustements des TAI-TA(i) effectués par le BIH, affectent sensiblement la qualité des étalonnages. Il signale que peu de progrès ont été réalisés sur CS2 et les masers à hydrogène ; le travail sur la synthèse des fréquences des infrarouges est poursuivi, en particulier par l'étude des diodes à pointe et

et des lasers pompés.

Mr *Bailey* mentionne que l'étalon à jet de césium du National Physical Laboratory pourra apporter des résultats avant la fin de l'année 1977. Les travaux sur les masers à hydrogène sont provisoirement suspendus.

MM. *Pouchkine* et *Sagine* indiquent que l'étalon à jet de césium construit au Gosstandart de l'U.R.S.S. en 1975 a une exactitude de 3 à 4×10^{-13} . Trois jeux de masers à hydrogène sont maintenant disponibles. Les derniers instruments, construits en 1976, ont une reproductibilité de 0,6 à $1,2 \times 10^{-13}$. Trois masers à hydrogène et six étalons à césium commerciaux contribuent à former les échelles TA(SU) et UTC(SU).

Mr *Audoïn* présente les travaux réalisés dans les laboratoires français. L'amélioration des masers à hydrogène est poursuivie. L'étude des étalons de fréquence infrarouge et visible et de leur raccordement aux fréquences radioélectriques a été entreprise.

2. ÉTAT ACTUEL DU TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL (TAI)

Mr *Guinot* présente un rapport sur cette question (Annexe S 4). Il insiste sur le fait que la qualité des travaux sur le TAI est actuellement limitée par le manque de précision des comparaisons de temps. Il fait aussi remarquer que les discussions sur les incertitudes des étalonnages du TAI ont un intérêt essentiellement théorique. La combinaison des données des laboratoires en utilisant des modèles statistiques fort différents pour ces étalonnages ne fait apparaître que des divergences de l'ordre de 2×10^{-14} .

3. LIMITATIONS DANS L'ÉTABLISSEMENT ET LA DIFFUSION DU TAI

Sur grandes distances, les horloges sont actuellement comparées par le LORAN-C et par les transports d'horloges. Le LORAN-C introduit des erreurs progressives qui atteignent, par exemple, 0,5 μ s en quelques années. Les transports

d'horloges dont l'exactitude est assurée avec des incertitudes généralement inférieures à $0,1 \mu\text{s}$ sont beaucoup plus satisfaisants, mais ils sont trop peu fréquents pour les travaux courants.

De nombreuses expériences ont montré que les liaisons par satellites artificiels peuvent apporter une précision et une exactitude améliorées ainsi qu'une couverture mondiale. Ainsi, des liaisons expérimentales ont été établies entre le Japon et les États-Unis d'Amérique, à l'aide de ATS-1 et entre l'Allemagne et la France à l'aide de "Symphonie" avec des incertitudes voisines de 1 ns (précision) ; dans l'expérience faite avec ATS-1, l'exactitude était de l'ordre de 10 ns .

Actuellement, le satellite expérimental NTS-1 du futur "Global Positioning System" est utilisé entre les États-Unis d'Amérique, la Grande-Bretagne et l'Australie avec une précision de $0,2 \mu\text{s}$ et une exactitude de $1 \mu\text{s}$. Mais on ne peut se fonder sur ces résultats, car le satellite est défectueux : le Global Positioning System devrait fournir des comparaisons d'horloges courantes avec une exactitude de 50 à 100 ns , sans complications instrumentales.

Des membres du CCDS se demandent s'il n'y aurait pas lieu d'organiser une réunion ou un groupe de travail sur les liaisons horaires par satellite. Mais il semble suffisant que les aspects scientifiques soient considérés par l'Union Radioscopique Internationale et les aspects opérationnels par le Comité Consultatif International des Radiocommunications.

Afin de réduire les inconvénients des moyens existants, il est suggéré de comparer entre eux les étalons de fréquence en faisant usage des transports d'horloges au lieu du LORAN-C. De même, ces transports d'horloges pourraient réduire l'incertitude des étalonnages du TAI. Mr *Smith* propose même d'organiser des campagnes d'étalonnages simultanés, mais cette organisation présente des contraintes excessives et est jugée peu compatible avec la recherche sur les étalons.

4. ÉTAT ET UTILISATION DU TEMPS UNIVERSEL COORDONNÉ

Mr *Markowitz* demande des éclaircissements sur la suite

que la Conférence Générale des Poids et Mesures a donnée à la Recommandation S 1 (1974).

Mr *Terrien* rappelle que la 15^e CGPM a recommandé que le Temps Universel Coordonné (sigle UTC) soit la base des temps légaux, mais qu'elle a ignoré l'emploi du sigle UT à employer pour les cas où aucune confusion n'est à craindre.

Plusieurs pays ont entrepris de modifier leur définition de l'heure légale afin de la fonder sur UTC (Allemagne, Espagne, France, ...).

5. RECOMMANDATIONS DE LA 16^e ASSEMBLÉE GÉNÉRALE DE L'UNION ASTRONOMIQUE INTERNATIONALE

Mr *Markowitz* a commenté les résolutions au sujet du temps adoptées par l'UAI à Grenoble, en août 1976. Ces résolutions avaient été distribuées précédemment par le président du CCDS. Il n'y a eu ni questions, ni commentaires.

6. MISE EN OEUVRE DES TECHNIQUES DE PILOTAGE DU TAI

Jusqu'à présent, le TAI repose sur les données d'un ensemble d'horloges traitées de façon à assurer la meilleure stabilité. Mais, par suite des fluctuations aléatoires et systématiques de ces horloges, la fréquence du TAI peut différer de sa valeur idéale. Au cours de sa 7^e session, en 1974. Le CCDS avait admis qu'un asservissement de la fréquence du TAI (pilotage) pouvait être avantageux et il avait recommandé sa mise en oeuvre.

Toutefois, le défaut d'exactitude du TAI était alors voisin de 10×10^{-13} et il ne pouvait être résorbé qu'après un temps trop long si l'on désirait que les ajustements de fréquence du TAI soient restreints à une valeur correspondant aux fluctuations aléatoires du TAI [Recommandation S 4 (1974)].

A la suite d'une correspondance entre les membres du CCDS, il avait été décidé de différer la mise en oeuvre du pilotage jusqu'à ce que l'importante erreur initiale de fréquence soit corrigée. A la suite des recommandations de l'UAI, cette correction a été effectuée le 1^{er} janvier 1977.

La fréquence du TAI se trouve maintenant très proche de sa valeur nominale et le moment est venu d'entreprendre le pilotage.

Mr *Granveaud* expose les travaux accomplis au BIH. En résumé, dans l'hypothèse où les étalonnages successifs du TAI sont affectés de bruit blanc sur la fréquence, le pilotage le plus efficace consiste à combiner tous les étalonnages passés à l'aide d'un filtre optimal qui a été établi, dès qu'un nouvel étalonnage apparaît, puis d'appliquer au TAI la correction de fréquence trouvée. Il est précisé que cette méthode exige le maintien d'une "échelle libre", calculée sans tenir compte des étalonnages et qui sert de référence pour ces étalonnages. TAI est alors déduit de cette échelle libre.

Mr *Barnes* propose qu'une correction ne soit appliquée au TAI que dans le cas où son erreur de fréquence excéderait une tolérance fixée, afin d'éviter des fluctuations à court terme qui ne seraient pas dues aux horloges, mais aux étalonnages par des étalons primaires.

Mr *Becker* propose que tous les étalonnages de la fréquence du TAI durant une année soient utilisés pour former une moyenne pondérée. L'incertitude $\sqrt{2} \times \sigma$ du résultat devrait être utilisée comme seuil de tolérance. Le pilotage ne s'exercerait que l'année suivante, en cas de dépassement de la tolérance, par un ajustement progressif de la fréquence du TAI.

Mr *Guinot* objecte que l'utilisation de tolérances, si elles sont larges, et le retard à l'application des corrections conduisent l'une comme l'autre à une dégradation de la stabilité à long terme comme l'ont prouvé des simulations.

Comme la discussion prend un caractère très technique, le *Président* suggère qu'un groupe de travail formé par les principaux intéressés par ces problèmes se réunisse dans l'après-midi du 26 avril et fasse part au CCDS le lendemain de ses conclusions.

Les conclusions de ce groupe de travail sont les suivantes :

Il ne faut pas fixer de périodicité pour les ajustements de fréquence du TAI, car ce serait une incitation aux laboratoires primaires à effectuer des opérations de routine au détriment de la recherche. L'application d'une tolérance peut éviter quelques fluctuations à court terme de la fréquence du TAI, mais cette tolérance doit être petite (Mr Guinot suggère $0,2 \times 10^{-13}$ dans les conditions présentes). La rapide évolution technique ne permet pas de fixer des règles trop précises. Le BIH doit pouvoir agir avec une liberté suffisante pour tirer profit des améliorations techniques qui pourraient survenir. Il paraît utile, afin de maintenir des contacts étroits entre les laboratoires primaires et le BIH, d'établir un groupe de travail du CCDS pour conseiller le BIH du point de vue technique en ce qui concerne le niveau de confiance dans les mesures, la tolérance et les méthodes de pilotage. Ces divers points font l'objet de la *Recommandation S 1* (1977).

Il a été précisé, suivant les suggestions de Mr Smith, que ce groupe de travail ne devrait pas donner d'instructions au directeur du BIH. Si des changements importants des procédés du BIH étaient proposés, ils devraient être soumis au Comité de direction du BIH (par l'intermédiaire du CCDS, si c'était nécessaire). Une étroite coopération devrait être maintenue entre le groupe de travail et le Comité de direction du BIH ; ce groupe devrait comprendre le président du Comité de direction du BIH comme membre *ex officio*.

7. QUESTIONS DIVERSES

—Le *Président* suggère que le CCDS prenne l'initiative d'une réunion entre ses membres et des spécialistes de la Relativité, afin d'éclairer le CCDS sur le rôle des corrections relativistes dans la mesure du temps.

Mr Guinot estime que ces spécialistes ne sont guère intéressés par nos problèmes opérationnels. Les diverses théories de la relativité qui sont viables donnent les mêmes corrections, avec une précision bien supérieure à celle qu'il nous faut, tant pour l'exploitation des horloges fixes ou mobiles que pour les méthodes de comparaison de temps par ondes électromagnétiques. Mr Winkler approuve ce

point de vue.

— Mr *Becker* demande s'il y a lieu de tenir compte des termes dus à la rotation terrestre dans le champ gravitationnel solaire (ces termes sont de l'ordre de 1 μ s).

Mr *Winkler* et Mr *Guinot* mentionnent que ces termes disparaissent dans les comparaisons d'horloges. Mr *Winkler* est en train d'organiser une expérience pour s'assurer qu'il en est bien ainsi.

— Mr *Costain* estime qu'on devrait unifier et collationner les heures d'été et suggère que le CCDS recherche l'organisme qui pourrait s'en charger, comme l'Organisation des Nations Unies ou l'UNESCO. Une fois de plus, le problème reste sans solution.

— Mr *Guinot* signale qu'il compte faire une proposition à l'Agence Spatiale Européenne pour mettre en oeuvre un système de synchronisation par satellites utilisant des lasers. L'exactitude escomptée serait de 1 à 0,1 μ s.

*
* *

Le *Président* remercie les membres du CCDS et clôt la session le 27 avril 1977 à 11 h 30.

(Mai 1977 ;
révisé en août 1977)

R E C O M M A N D A T I O N
du Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde
présentée
au Comité International des Poids et Mesures

Pilottage du Temps Atomique International ; constitution d'un
Groupe de travail

RECOMMANDATION S 1 (1977) *

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS),

considérant

- qu'un pilotage utilisant la meilleure estimation disponible de l'unité de temps, en faisant appel à des étalons primaires de temps et de fréquence, améliorera l'exactitude et la stabilité à long terme du Temps Atomique International (TAI), comme il l'a déjà affirmé, à sa 7^e session, dans sa Recommandation S 4 (1974),

- que la mise en oeuvre de ce pilotage par le Bureau International de l'Heure (BIH) a été retardée, en raison de la nécessité de corriger d'abord la fréquence du TAI de 1×10^{-12} , ce qui a été fait au 1^{er} janvier 1977,

recommande

1. que le BIH mette en oeuvre un pilotage du TAI fondé sur les résultats de mesures appropriées fournis par des étalons primaires de temps et de fréquence,

2. qu'on utilise à cet effet, autant que possible, les méthodes de comparaison les plus exactes, comme les transports d'horloges ou les liaisons par satellite,

3. que ce pilotage soit réalisé au moyen d'ajustements de fréquence et que ces ajustements restent petits par rapport au bruit de fréquence du TAI,

4. qu'aucun ajustement ne soit effectué si la différence entre l'intervalle unitaire du TAI et la seconde du SI au niveau de la mer (voir "Mise en pratique du Temps Atomique International", CCDS, 5^e session, 1970, p. S 22) n'excède pas une tolérance déterminée,

* Cette Recommandation a été approuvée par le Comité International des Poids et Mesures à sa 66^e session (septembre 1977).

5. qu'un Groupe de travail du CCDS soit constitué pour conseiller le BIH, du point de vue technique, en ce qui concerne le niveau de confiance dans les mesures, la tolérance et les méthodes de pilotage,

6. que ce Groupe de travail soit composé

- a) de représentants des laboratoires dont les étalons primaires contribuent au pilotage du TAI,
- b) du président du Comité de direction du BIH,
- c) du directeur du BIH et
- d) du directeur du Bureau International des Poids et Mesures,

et qu'il se réunisse lorsque le directeur du BIH l'estime nécessaire.

RAPPORT DU PRÉSIDENT

DU

COMITÉ CONSULTATIF POUR LES ÉTALONS DE MESURE
DES RAYONNEMENTS IONISANTS

AU

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Résumé. - L'emploi croissant des rayonnements ionisants (réacteurs nucléaires, médecine, industrie) nécessite des mesures de plus en plus exactes des grandeurs concernant les rayons X et γ , la radioactivité et les neutrons. Le BIPM, organisme centralisateur du système international des mesures dans ce domaine, est assisté dans sa tâche par le Comité Consultatif pour les Etalons de Mesure des Rayonnements Ionisants (CCEMRI), qui est lui-même divisé en trois sections : Rayons X et γ , électrons ; Mesure des radionucléides ; Mesures neutroniques. On étudie, pour chacune de ces sections, les points suivants : besoin en étalons et comparaisons internationales de ces étalons, programme de travail, réalisations et projets pour les travaux à venir.

Abstract. - The increasing use of ionizing radiations (nuclear reactors, medicine, industry) calls for more and more accurate measurements of X and γ rays, radioactivity and neutrons. The Bureau International des Poids et Mesures, which is the central organization of the international measurements in this field, is assisted in its work by the Comité Consultatif pour les Etalons de Mesure des Rayonnements Ionisants, consisting itself of three sections : X and γ Rays, electrons ; Radionuclide measurements and Neutron measurements. The following points are discussed under each section : need for standards and their international comparison, program of activities, accomplishments and plans for future work.

INTRODUCTION

L'emploi des rayonnements ionisants ne cesse de s'étendre, en liaison avec le développement de l'utilisation de l'énergie nucléaire et la multiplicité croissante des applications de ces rayonnements en médecine et dans l'industrie. Par ailleurs, toutes les nations sont de plus en plus intéressées par les

problèmes de sécurité liés à l'utilisation des rayonnements ionisants ; en conséquence, on crée fréquemment des organismes qui promulguent des réglementations exigeant des mesures exactes.

Les mesures exactes de rayonnement prennent donc de plus en plus d'importance. On a besoin, afin d'établir les données nécessaires pour concevoir de façon efficace les réacteurs nucléaires, de mesurer les grandeurs concernant les neutrons, les rayons X, les rayons γ et la radioactivité avec une exactitude d'environ 1 %. Pour la radiothérapie, on a besoin d'une exactitude de 5 % sur les doses de rayonnement délivrées, ce qui nécessite de connaître les étalons de mesure de rayonnement avec une exactitude de 1 ou 2 %. Si l'on a besoin de la plus haute exactitude dans certaines applications, l'utilisation étendue des rayonnements dans la vie courante exige des mesures fiables, d'une exactitude quelque peu inférieure, dans le domaine des faibles irradiations concernant la protection des travailleurs, le grand public et l'environnement. Dans ce domaine de la protection, on peut citer comme exemple les contrôles individuels pour les travailleurs exposés aux rayonnements, les mesures des effluents radioactifs provenant des centrales nucléaires et les mesures de la radioactivité de l'eau, de l'air et du sol. On a également besoin de mesures exactes concernant des matériaux radioactifs pour les transactions commerciales, en particulier dans le cas des produits pharmaceutiques radioactifs utilisés en diagnostic médical, mais aussi pour des applications telles que les références de taux de combustion des combustibles nucléaires. Etant donné tous ces besoins et le fait que les mesures sont souvent très difficiles, les problèmes de mesure des rayonnements et le rôle du BIPM comme organisme centralisateur du système international des mesures dans ce domaine sont des sujets de la plus haute priorité.

Le Comité Consultatif pour les Etalons de Mesures des Rayonnements Ionisants (CCEMRI) est divisé en trois sections : Section I : Rayons X et γ , électrons, présidée par W.A. Jennings (NPL) ; Section II : Mesure des radionucléides, présidée par P.J. Campion (NPL) ; Section III : Mesures neutroniques, présidée par R.S. Caswell (NBS).

Le présent rapport ⁽¹⁾ est divisé en trois chapitres correspondant à ces trois sections. Dans chacun de ces chapitres, nous envisagerons les points suivants :

A. Besoin en étalons et comparaisons internationales de ces étalons ; B. Programme de travail ; C. Réalisations ; D. Projets pour les travaux à venir.

Un résumé du programme de travail et des réalisations est donné dans le tableau II.

SECTION I - RAYONS X ET γ , ÉLECTRONS

A. Besoins en étalons d'exposition, de dose absorbée et éventuellement d'autres grandeurs, et comparaisons internationales de ces étalons

Comme indiqué dans l'Annexe R 1 du Rapport de la 6^e session du CCEMRI (1975), on a besoin d'établir et de maintenir des étalons pour la mesure des rayonnements ionisants dans trois gammes très différentes de dose absorbée, couvrant un domaine d'environ neuf ordres de grandeur. Ainsi nous avons affaire à des doses absorbées, exprimées dans la nouvelle unité SI, le gray (1 gray = 100 rads), de quelques dizaines de micrograys (ou millirads) en radioprotection, de quelques dizaines de grays (ou kilorads) en radiothérapie et de quelques dizaines de kilograys (ou mégarads) dans le domaine des applications industrielles.

Pendant de nombreuses années, la grandeur utilisée comme référence pour les faisceaux photoniques a été l'*exposition*, exprimée en röntgens (maintenant en $C\ kg^{-1}$), et les étalons d'exposition ont fait l'objet de comparaisons internationales au BIPM dans le domaine des débits d'exposition utilisés en radiothérapie.

Récemment, plusieurs laboratoires nationaux se sont dotés d'étalons de *dose absorbée* et, depuis la dernière réunion du CCEMRI, on a effectué les premières comparaisons internationales avec des débits de dose absorbée courants en radiothérapie (voir paragraphe C. 1.).

(1) Ce rapport résume les rapports présentés au CIPM sur la 7^e session (juillet 1977) du CCEMRI et sur les réunions de ses Sections I, II, III qui ont eu lieu en mai et juin 1977. Suivant l'usage, ces rapports font l'objet de publications séparées.

L'introduction de l'unité SI d'exposition, le C kg⁻¹, égal à 3,876 kiloröntgens, et la nécessité d'étalonner les instruments usuels en dose absorbée ont conduit à proposer que les étalons actuels d'exposition soient remplacés par des *étalons de kerma* dans l'air, grandeur mesurée en grays. Les laboratoires nationaux ont accepté d'étudier la possibilité de réaliser un tel changement. Etant donné les conséquences qu'il peut entraîner pour les chaînes d'étalonnage, une réunion supplémentaire de la Section I a été prévue en décembre 1977, afin d'arrêter une ligne de conduite.

Il est possible qu'à l'avenir d'autres grandeurs prennent une importance semblable dans la mesure des rayonnements ionisants, par exemple la *fluence énergétique* et sa distribution spectrale. La Section I restera attentive au besoin éventuel de tels étalons.

B. Programme de travail

1. Le BIPM continuera d'agir comme centre pour comparer les étalons nationaux primaires d'exposition et de dose absorbée par l'intermédiaire des étalons stables qui se trouvent à Sèvres. En fonction de la décision qui sera prise à la prochaine réunion de la Section I, en décembre 1977, il est possible que les étalons d'exposition soient remplacés par des étalons pour la mesure du kerma dans l'air.

2. Le laboratoire du BIPM continuera à couvrir les domaines de 10 à 50 kV et de 50 à 250 kV, ainsi que les photons du ⁶⁰Co pour les mesures d'exposition, et les photons du ⁶⁰Co seulement pour les mesures de dose absorbée ; dans tous les cas, les débits de dose absorbée seront comparables à ceux qui sont utilisés en thérapie ($\approx 10 \text{ mGy s}^{-1}$).

3. Des mesures complémentaires relatives au programme ci-dessus seront poursuivies au BIPM et ailleurs, et la Section I continuera à exercer son rôle de coordinateur pour les comparaisons internationales effectuées dans d'autres laboratoires, pour les photons ou pour d'autres rayonnements (*voir* aussi paragraphes C et D).

C. Réalisations

Depuis la dernière réunion du CCEMRI, les travaux suivants ont été réalisés.

1. Source de ^{60}Co et étalons de dose absorbée

Grâce au National Bureau of Standards (NBS), le BIPM a pu faire l'acquisition d'une source de ^{60}Co de 170 TBq ; on a procédé à son installation en vue des mesures de dose absorbée. Des comparaisons entre l'étalon calorimétrique de dose absorbée du NBS, celui du Laboratoire de Métrologie des Rayonnements Ionisants (LMRI) et l'étalon ionométrique du BIPM ont déjà été effectuées ; une comparaison de ce dernier avec l'étalon de la Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) est prévue vers la fin de 1977. Une comparaison directe des étalons de dose absorbée du NBS et du LMRI a également eu lieu au LMRI. Pour l'ensemble de ces comparaisons, les écarts sont de l'ordre de 0,5 %.

2. Étalons d'exposition

Des comparaisons ont été faites récemment au BIPM au moyen des instruments de transfert du NBS et du National Physical Research Laboratory (NPRL), Afrique du Sud, dans le domaine de 100 à 250 kV. Les comparaisons faites ailleurs concernent des étalons de l'IMM, de l'ASMW, du PKNM, de l'OMH⁽²⁾ et de trois laboratoires de Tchécoslovaquie, dans trois domaines (10 à 50 kV, 50 à 250 kV et ^{60}Co). Une liste détaillée des comparaisons récentes se trouve dans le rapport de la Section I, 4^e réunion (1977).

3. Étalons de rayonnement bêta

Des comparaisons d'étalons de dose absorbée pour le rayonnement bêta, dans le domaine de la radioprotection, ont eu lieu récemment entre le LMRI et la PTB, ainsi qu'entre la PTB et le National Physical Laboratory (NPL). L'accord est excellent.

4. Corrections pour l'humidité

Depuis la dernière réunion du CCEMRI, de nouvelles mesures ont été effectuées au PKNM avec des chambres à parois d'air et au Rijks Instituut voor de Volksgezondheid (RIV) avec des chambres à cavité. Le désaccord existant précédemment a été expliqué et un accord est intervenu sur les facteurs de correction à recommander.

(2) IMM : Institut de Métrologie D.I. Mendéléev, U.R.S.S. ; ASMW : Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung, République Démocratique Allemande ; PKNM : Polski Komitet Normalizacji i Miar, Pologne ; OMH : Országos Mérésügyi Hivatal, Hongrie.

5. Expression de l'incertitude

Plusieurs propositions ont été étudiées concernant l'expression de l'incertitude dans les certificats d'étalonnage, mais aucune décision n'a été prise lors de la dernière réunion de la Section I. La question sera reprise à la réunion de décembre 1977.

D. *Travaux futurs*

1. Des étalons calorimétriques de dose absorbée sont à l'étude au NPL, au RIV et à l'OMH ; dès qu'ils seront au point, ils seront comparés à l'étalon ionométrique du BIPM. Une telle comparaison est déjà prévue avec l'étalon de la PTB. Par ailleurs, le National Research Council (NRC) et le NBS projettent de comparer leur étalon calorimétrique à l'étalon ionométrique du BIPM et aux étalons d'autres laboratoires nationaux, au moyen d'instruments de transfert.

2. Les comparaisons d'étalons d'exposition, ou éventuellement d'étalons de kerma dans l'air, se poursuivront périodiquement, l'intervalle entre les comparaisons dépendant de la stabilité des étalons nationaux et des méthodes utilisées pour vérifier cette stabilité.

3. Point effectif de mesure. - Des travaux complémentaires, théoriques et expérimentaux, sont nécessaires en ce qui concerne le point effectif de mesure et les laboratoires nationaux sont invités à entreprendre une telle étude.

4. Mesure de rayonnements pour l'usage industriel. - Les membres de la Section I sont invités à soumettre, lors de la réunion de 1979, des rapports sur l'exactitude et l'uniformité dont on a besoin dans la mesure des rayonnements pour les irradiations du type industriel, afin d'apprécier si le BIPM doit jouer un rôle dans ce domaine.

5. Autres sujets à ne pas perdre de vue :

- a) Mesures dans le domaine de la radioprotection ;
- b) Mesures dans le domaine des très grands débits de dose absorbée ;
- c) Comparaisons aux énergies élevées ($> {}^{60}\text{Co}$) pour les faisceaux de photons et d'électrons.

La Section I continue également à s'intéresser, d'une part aux problèmes qui peuvent surgir du fait de l'introduction des unités SI dans la mesure des rayonnements ionisants et, d'autre

part, à la coopération nécessaire entre les laboratoires nationaux en vue de l'établissement par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) et l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) d'un réseau de laboratoires de dosimétrie dotés d'étalons secondaires.

SECTION II - MESURE DES RADIONUCLÉIDES

A. *Besoin en étalons et comparaisons internationales de ces étalons*

On utilise actuellement un très grand nombre de radionucléides ayant chacun son propre schéma de désintégration. Pour caractériser les radionucléides on détermine leur activité, c'est-à-dire le nombre de transitions nucléaires qui se produisent par seconde. On a besoin d'étalons d'activité dans les applications médicales (pour des radionucléides comme le ^{131}I et le $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$), mais leur importance augmente aussi en radioprotection, en particulier pour tout ce qui a trait aux centrales nucléaires ; à cet égard, le ^{90}Sr et le ^{239}Pu sont des radionucléides importants. De plus, on a besoin de mesures d'activité de grande exactitude pour déterminer les débits de fluence de neutrons (par exemple avec le ^{56}Mn) ou la consommation de combustible nucléaire (par exemple avec le ^{137}Cs), et dans bien des cas pour l'étalonnage d'instruments. Les utilisateurs de sources radioactives étalonnées ont besoin d'exactitudes de l'ordre de 0,5 à 10 %, selon l'utilisation finale, et la plupart des laboratoires nationaux doivent garantir une exactitude de 0,1 à 2 %. Des comparaisons périodiques organisées par le BIPM sont nécessaires pour que les laboratoires nationaux puissent vérifier l'exactitude de leurs propres mesures. Toutefois, étant donné le grand nombre de radionucléides concernés, le BIPM doit sélectionner soigneusement ceux qui jouent le rôle le plus important dans le contrôle des mesures.

B. *Programme de travail*

Les principaux éléments du programme de travail de la Section II qui sont décrits dans l'Annexe R 1 du rapport de la 6^e session du CCEMRI (1975) sont les suivants :

1. achèvement de la série de rapports sur la métrologie des radionucléides (voir Tableau III) ;
2. mise en oeuvre du système de comparaison continue des

étalons d'activité au moyen de chambres d'ionisation de référence ;

3. exécution d'une nouvelle série de comparaisons internationales pour quelques radionucléides tels que le ^{134}Cs et le ^{139}Ce ;

4. autres services, tels que la distribution d'étalons d'activité sous forme de sources solides sur films minces, par exemple ^{60}Co et ^{54}Mn .

C. Réalisations

1. Comparaison internationale de ^{139}Ce

Le NPRL a fourni gracieusement un échantillon pur de ^{139}Ce et on a déployé une somme d'efforts considérables pour préparer et organiser la comparaison, afin que les opérations se déroulent sans incidents, et pour éliminer les influences perturbatrices. Les résultats obtenus par les 22 laboratoires participants sont très encourageants ; ils seront publiés prochainement sous forme de rapport BIPM⁽³⁾. L'écart-type de la distribution des résultats, estimé sur la même base que pour les comparaisons précédentes de ^{60}Co ⁽⁴⁾, est 0,19 % ; bien qu'il soit difficile de faire des comparaisons exactes, ceci peut être comparé au meilleur résultat (0,31 %) obtenu dans le passé avec des solutions de ^{60}Co . De plus, le résultat actuel est meilleur que le résultat de 0,26 % obtenu en 1965 avec des sources solides de ^{60}Co pour lesquelles on n'avait pas à considérer les incertitudes dues à la dilution et à la préparation des sources. Etant donné que le ^{139}Ce est considéré comme un nucléide plus difficile à mesurer que le ^{60}Co (la technique d'extrapolation de l'efficacité tient une place importante dans la mesure), ce résultat représente une amélioration considérable ; s'il ne faut pas attribuer trop d'importance aux résultats d'une seule comparaison, cela constitue néanmoins une justification partielle de la politique adoptée par la Section II : se concentrer sur des problèmes spécifiques associés aux mesures d'activité plutôt que sur les comparaisons internationales. Dans cet ordre d'idées, il est intéressant de noter qu'au moins un laboratoire a fait usage de certaines techniques décrites dans une monographie du BIPM⁽⁵⁾ ; il en est résulté une correction de

(3) Rapport BIPM-77/4 (1977).

(4) Campion, P.J., *Nucl. Instr. and Methods*, 112 (1973), p. 41.

(5) Monographie BIPM-2 (1976), The detection and estimation of spurious pulses, *Recueil de Travaux du BIPM*, 5, 1975-1976 (article 26).

1,3 % de ses résultats qui, ainsi corrigés, sont en bien meilleur accord avec ceux des autres laboratoires.

2. Comparaison internationale de ⁵⁷Co

Cette comparaison, limitée à six participants, avait pour but de vérifier le degré d'uniformité des mesures pour une classe de nucléides qui joue un rôle important dans les mesures absolues de débit de fluence de neutrons au moyen de la méthode de l'activité associée. Les résultats sont encourageants : l'écart-type estimé de la distribution des valeurs obtenues est d'environ 0,2 % ; cela permet de penser que l'incertitude sur la mesure de l'activité est beaucoup plus faible que certaines autres incertitudes inhérentes à cette méthode.

3. Mesures à l'aide des chambres d'ionisation du BIPM

Un système semi-automatique pour la mesure du courant d'ionisation a été mis en place et vérifié soigneusement. Les courants d'ionisation produits par des solutions émettrices de rayonnement γ sont comparés au courant produit par une source de ²²⁶Ra utilisée comme référence. Quatre sources semblables, mais plus faibles, et une seconde chambre d'ionisation (identique à la première) permettent de vérifier la stabilité de l'ensemble. Les résultats des échantillons expédiés par onze laboratoires (AAEC, AECL, ASMW, BIPM, ETL, IEA, OMH, NBS, NPL, PTB et UVVVR) ⁽⁶⁾ sont consignés dans des tables régulièrement tenues à jour qui constituent donc un système international permanent de référence pour la mesure de l'activité des nucléides émetteurs de rayons γ . Ces tables sont expédiées périodiquement aux participants.

Ce système de référence s'est déjà avéré très utile. Il permet d'établir un rattachement des mesures sur le plan international, de façon simple et continue ; quand on disposera d'un plus grand nombre de résultats, il pourrait avoir une influence considérable sur les buts poursuivis dans les comparaisons internationales futures.

(6) AAEC : Australian Atomic Energy Commission, Australie ; AECL : Atomic Energy of Canada Limited, Canada ; ASMW : Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung, Rép. Dém. Allemande ; BIPM : Bureau International des Poids et Mesures, France ; ETL : Electrotechnical Laboratory, Japon ; IEA : Instituto de Energia Atômica, Brésil ; OMH : Országos Mérésügyi Hivatal, Hongrie ; NBS : National Bureau of Standards, U.S.A. ; NPL : National Physical Laboratory, Royaume-Uni ; PTB : Physikalisch- Technische Bundesanstalt, Rép. Féd. d'Allemagne ; UVVVR : Ústav pro Výzkum, Výrobu a Využití Radioisotopů, Tchécoslovaquie.

4. Etudes sur la méthode des coïncidences

Un groupe de travail a fait une étude du principe de la technique des coïncidences pour mesurer l'activité. Il a écrit plusieurs rapports sur des sujets tels que la mesure exacte du temps mort et les effets produits dans des systèmes comportant deux ou plusieurs temps morts en série. Par ailleurs, les membres de ce groupe ont entrepris un travail expérimental commun pour étudier le comportement des équipements à des taux de comptage élevés. Ce fut un nouveau succès puisque, au cours de l'expérience, les organisateurs ont réussi à intéresser un excellent mathématicien aux problèmes associés aux taux de comptage élevés. Il en est résulté une publication⁽⁷⁾ qui donne une solution exacte, dans le cas d'un modèle proche d'une situation réelle, pour le calcul des corrections dues aux temps morts et au temps de résolution dans la technique de comptage par coïncidences. Ce progrès est surtout d'ordre conceptuel ; il en résulte néanmoins une amélioration de l'exactitude du comptage, par rapport à l'ancienne formule de Bryant, pour des taux de comptage atteignant 10^5 s^{-1} . Les limitations résident désormais dans d'autres facteurs tels que la nature mal définie des temps morts imposés expérimentalement. En tout cas, il s'agit d'un progrès remarquable dans la science des mesures des radionucléides.

D. *Travaux futurs (y compris activités en cours)*

S'il est inopportun de présenter de façon détaillée tous les aspects du programme de la Section II, il convient cependant de souligner certains des traits les plus saillants des travaux en cours ainsi que les projets retenus lors de la dernière réunion.

La discussion sur la définition de l'activité a occupé une grande partie du temps, non que la Section fût incapable d'arriver à un accord sur une définition, mais plutôt parce qu'il s'est avéré difficile de persuader l'International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) que l'approche de la Section II était la plus appropriée. Il semble qu'il existe toujours un certain désaccord entre la Section II et l'ICRU, mais on espère trouver une solution dans un avenir pas trop éloigné.

(7) Cox, D.R. and Isham, V., A bivariate point process connected with electronic counters, *Proc. Roy. Soc.*, A 356, pp. 149-160 (1977).

L'intérêt évident que présente le comptage à l'aide de scintillateurs liquides, particulièrement pour la méthode de l'indicateur d'efficacité, incite à continuer l'étude entreprise par un groupe de travail. Une comparaison restreinte de ^{134}Cs vient d'être effectuée en utilisant cette méthode, mais quatre laboratoires nationaux seulement ont pu y participer. Tous les résultats ne sont pas encore disponibles, si bien qu'il n'a pas été possible de faire une analyse approfondie ; cependant, les résultats de trois laboratoires présentent un bon accord. Le groupe de travail prépare un rapport sur l'emploi de cette méthode qui fait l'objet d'améliorations constantes dues en partie à l'intérêt porté au sujet par le groupe de travail.

Le groupe de travail sur les sources de référence de rayonnement γ a organisé une comparaison internationale de sources étalonnées, préparées par les laboratoires nationaux. Une série de sources étalonnées est envoyée par chaque laboratoire à la PTB qui s'est chargée de faire les mesures de comparaison. En outre, des échantillons des solutions utilisées par les laboratoires pour préparer ces sources sont comparés dans le système de référence du BIPM.

Les travaux du groupe qui étudie les principes de la méthode des coïncidences ont conduit, comme indiqué plus haut, à une expérience avec des taux de comptage élevés et celle-ci, à son tour, est à l'origine d'un progrès important dans la théorie correspondante. Il est certain qu'il reste au groupe de travail concerné à assimiler les implications de ce progrès.

Une comparaison internationale à grande échelle sera organisée en 1978 avec le ^{134}Cs . Ce radionucléide a un schéma de désintégration considérablement plus complexe que celui du ^{139}Ce et, de ce fait, la comparaison proposée est une étape logique dans la progression de la métrologie des radionucléides simples aux plus complexes. De plus, on envisage à la même époque une comparaison de ^{137}Cs ; il est possible que les laboratoires utilisent le ^{134}Cs comme indicateur pour le ^{137}Cs , mais d'autres indicateurs peuvent également être employés.

Il a été décidé d'organiser une comparaison restreinte, plus spécialisée, de ^{55}Fe , représentant d'une classe de radionucléides qui n'ont pas encore été comparés sous les auspices du BIPM.

Etant donné l'intérêt manifesté pour l'emploi de chambres d'ionisation comme système de référence pour les radionucléides,

la Section II pense qu'il serait souhaitable d'écrire une monographie sur ce sujet. La rédaction en a été confiée à un membre de la Section, mais elle demande, de la part de l'auteur, un travail considérable et il est peu probable que ce document soit écrit avant la prochaine réunion.

Enfin, on a noté avec satisfaction qu'à la suite d'une suggestion faite à la précédente réunion de la Section II (1975), le nécessaire a été fait pour que les travaux du BIPM soient plus largement connus ; toutes les revues consultées ont accepté de publier les résumés qui leur ont été soumis. Cette procédure pourrait être étendue à tous les rapports BIPM, qu'ils concernent la métrologie classique ou celle des rayonnements ionisants.

SECTION III - MESURES NEUTRONIQUES

A. *Besoin en étalons et comparaisons internationales de ces étalons*

Des mesures neutroniques exactes et cohérentes, et par conséquent des étalons neutroniques, sont nécessaires pour les raisons suivantes.

1. Développement de l'énergie nucléaire

On a besoin de mesures neutroniques pour déterminer les données qui entrent dans le calcul des projets de réacteurs nucléaires (à fission comme à fusion) et pour assurer le fonctionnement de ces réacteurs.

Les sections efficaces neutroniques sont des données essentielles pour le calcul des coeurs de réacteurs, des écrans de protection, de l'instrumentation et des systèmes de sécurité. Les nombreuses sections efficaces nécessaires sont généralement mesurées par rapport à une section efficace neutronique de référence telle que $H(n,n)H$, $^{10}B(n,\alpha)$ ou $^{235}U(n,f)$. Ces sections efficaces de référence doivent être connues à 1 % près, de façon à fournir des repères pour les mesures comparatives. A titre d'exemple, l'incertitude sur la section efficace de la réaction $^{235}U(n,f)$ était d'environ 13 % il y a quelques années et l'incertitude actuelle de 3 à 5 % ne donne pas encore satisfaction. Une connaissance insuffisante des sections efficaces entraîne des dépenses supplémentaires pour mettre à l'épreuve les projets de réacteurs ; elle entraîne aussi l'utilisation de

marges de sécurité plus importantes, ce qui conduit à un prix de revient accru des installations et, par conséquent, de l'énergie d'origine nucléaire. Pour améliorer l'exactitude des sections efficaces de référence, il est nécessaire de pouvoir mieux mesurer les débits de fluence de neutrons. Il ne suffit pas d'établir les projets de réacteurs ; il faut en outre effectuer des mesures de débit de fluence de neutrons, de distribution spectrale et de taux de fission dans le milieu très hostile de l'intérieur des réacteurs. Il est le plus souvent nécessaire de faire des mesures avec une exactitude contrôlable pour satisfaire les exigences réglementaires de sécurité.

2. Protection des travailleurs contre les rayonnements

Pour la protection des travailleurs exposés aux rayonnements, on a besoin de dosimètres neutroniques personnels et d'instruments de surveillance. Ces appareils doivent être étalonnés et leur réponse en fonction de l'énergie doit être connue. Dans certains pays, la loi prescrit que les instruments de protection du personnel doivent être étalonnés par le laboratoire national ou au moyen d'une source rattachée à ce laboratoire. Pour mettre au point et étalonner les instruments de contrôle neutroniques, on a besoin de faisceaux étalonnés de neutrons.

3. Radiothérapie neutronique

La thérapie du cancer au moyen des neutrons peut présenter un avantage du point de vue biologique sur la radiothérapie classique au moyen des rayons X, des rayons γ ou des électrons. Les premiers résultats d'essais cliniques effectués en Angleterre et aux Etats-Unis sont encourageants et ont conduit à la création d'une vingtaine d'installations (en service ou en construction). Pour mettre au point correctement ce procédé et lui assurer le maximum de succès, on a besoin d'étalons de dosimétrie neutronique (kerma, dose absorbée). Les laboratoires nationaux commencent à travailler dans ce domaine.

4. Autres applications

Les mesures neutroniques sont importantes dans la recherche scientifique, l'étude des matériaux par diffraction des neutrons, l'analyse par activation, la radiographie, la biologie et les applications industrielles. Les grandeurs physiques les plus importantes pour ces applications sont la fluence, la dose absorbée, le kerma et la distribution spectrale en énergie.

B. Programme de travail

Les projets de travaux décrits dans le rapport de la 6^e session du CCEMRI (1975) comprenaient :

1. l'essai de différents types d'instruments de transfert en vue de la comparaison internationale de débits de fluence de neutrons rapides monocinétiques (terminé en 1975) ;
2. l'exécution d'une comparaison internationale de mesures de débit de fluence de neutrons rapides monocinétiques ;
3. la mise en oeuvre d'un faisceau étalonné de neutrons d'environ 14,8 MeV ;
4. l'analyse de la comparaison internationale de dosimétrie neutronique (INDI).

C. Réalisations

1. Instruments de transfert pour la comparaison internationale de mesures de débit de fluence de neutrons rapides monocinétiques

Comme indiqué précédemment, ce travail a été achevé en 1975. Les instruments de transfert suivants ont été sélectionnés pour la comparaison : une sphère modératrice avec compteur à BF_3 , un compteur proportionnel à ^3He , une chambre à fission et des feuilles de fer pour la mesure de l'activité induite par la réaction $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$.

2. Comparaison internationale de mesures de débit de fluence de neutrons rapides monocinétiques

Neuf laboratoires ont déjà pris part à la comparaison. Les mesures effectuées sont résumées dans le tableau I.

Dans l'ensemble, les résultats obtenus sont raisonnablement concordants (dispersion des résultats d'environ 5 % ou moins), sauf à 250 keV où des écarts de 10 à 20 % sont apparus dans les mesures effectuées avec la sphère de polyéthylène associée au compteur à BF_3 .

On peut déjà tirer quelques conclusions de cette comparaison :

- a) La valeur absolue du débit de fluence de neutrons a été mesurée par chaque laboratoire participant avec une incertitude estimée qui se situe entre 2 et 3,5 % ; un grand effort est encore nécessaire pour améliorer les mesures afin de parvenir à une exactitude de 1 %.

TABLEAU I

Comparaison internationale de mesures de débit de fluence de neutrons rapides monocinétiques

<u>Energie des neutrons</u>	<u>Instrument de transfert</u>	<u>Laboratoires participants</u>
250 keV	{ sphère de polyéthylène + BF ₃ compteur à ³ He	NRC, CEN Cadarache, BCMN, NPL, ETL, PTB, NBS
		NRC, CEN Cadarache, NPL, ETL, PTB, NBS
565 keV	{ sphère de polyéthylène + BF ₃ compteur à ³ He	NRC, CEN Cadarache, NPL, ETL, PTB, NBS
2,20 MeV	sphère de polyéthylène + BF ₃	CEN Cadarache, BCMN, NPL, PTB
2,50 MeV	sphère de polyéthylène + BF ₃	BIPM, NRC, CEN Cadarache, BCMN, NPL, ETL, PTB
14,8 MeV	{ chambre à fission (²³⁸ U) réaction ⁵⁶ Fe(n,p) ⁵⁶ Mn	CEN Cadarache, BCMN, NPL, ETL, BIPM
		NPL, BCMN, IMM, ETL, BIPM

b) On a obtenu d'assez bons résultats dans la comparaison à 14,8 MeV en utilisant la chambre à fission à ²³⁸U et la méthode d'activation au moyen de feuilles de fer. Toutefois, le diamètre de la chambre à fission devrait être au moins doublé, pour permettre d'augmenter la distance cible-détecteur et de réduire ainsi l'incertitude sur la mesure de cette distance.

c) La sphère de polyéthylène utilisée comme instrument de transfert présentait le grave inconvénient d'être très sensible aux neutrons diffusés. D'après les résultats de la comparaison, il semble opportun dans ce cas d'utiliser un cône d'ombre pour évaluer la contribution des neutrons diffusés, surtout quand elle dépasse 10 %.

d) Pour remplacer la sphère, on aurait besoin d'un nouvel instrument de transfert doté à la fois d'une efficacité convenable et d'une faible sensibilité aux neutrons diffusés comme au rayonnement γ . Dans la mesure du possible, pour chaque énergie de neutrons, on devrait utiliser deux instruments de transfert fonctionnant suivant des principes différents.

Les résultats obtenus à ce jour sont rassemblés dans un rapport de V.D. Huynh intitulé "International comparison of flux density measurements for monoenergetic fast neutrons",

Proceedings of the International Specialists Symposium on Neutron Standards and Applications, Washington, D.C., March 28-31, 1977.

3. Mise au point de faisceaux étalonnés de neutrons monocinétiques

Conformément à une suggestion de la Section III, le BIPM a mis au point un second faisceau de neutrons monocinétiques d'énergie $14,680 \pm 0,130$ MeV, en plus du faisceau étalonné de neutrons monocinétiques de 2,50 MeV produits par la réaction $D(d,n)^3\text{He}$. Le nouveau faisceau est produit par la réaction $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$ au moyen de deutons incidents de 140 keV. Durant la période couverte par ce rapport, en plus de la comparaison de débits de fluence de neutrons discutée ci-dessus, le groupe des mesures neutroniques du BIPM s'est consacré essentiellement à l'amélioration de l'exactitude des mesures de débits de fluence de neutrons de 2,5 MeV et à la réalisation du nouveau faisceau de neutrons de 14,7 MeV.

a) Faisceau de neutrons $D(d,n)^3\text{He}$.- On dispose maintenant de quatre porte-cibles qui permettent d'observer les particules ^3He à 90° (cible à 45°), à 120° (cibles à 45° et 90°) et à 150° (cible à 90°). Le BIPM a comparé les mesures de débits de fluence effectuées par comptage des particules associées aux mesures faites au moyen d'un scintillateur de stilbène avec discrimination neutron- γ ; il a obtenu un bon accord ($\approx 1\%$).

b) Faisceau de neutrons $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$ à 14,7 MeV.- Le débit de fluence de neutrons a été mesuré par la méthode de comptage des particules associées. Le nombre de particules ^4He est mesuré dans un angle solide bien défini, au moyen d'une jonction à barrière de surface en silicium placée à 1 mètre de la cible et à 150° par rapport au faisceau incident de deutons. L'angle correspondant d'émission des neutrons est de 27° . La cible de $\text{Ti-}^3\text{H}$ a une masse surfacique de $550 \mu\text{g}/\text{cm}^2$; elle est déposée sur un support de cuivre de 0,5 mm d'épaisseur. Avec un courant de cible de 20 μA on obtient pour le faisceau de neutrons un taux d'émission de $1,6 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$.

Comme indiqué dans le tableau I, le BIPM a participé à la comparaison pour les énergies neutroniques de 2,50 et 14,8 MeV.

4. Analyse de la comparaison internationale de dosimétrie neutronique (INDI)

L'analyse a été achevée en 1976 et fera l'objet d'un rapport ICRU qui sera publié prochainement.

D. *Travaux futurs*

1. Comparaison internationale de mesures de débit de fluence de neutrons rapides monocinétiques

A la réunion de la Section III du CCEMRI qui s'est tenue à Sèvres du 30 mai au 1^{er} juin 1977, on a décidé de prolonger la comparaison jusqu'au 31 décembre 1977, afin de permettre une participation plus complète des laboratoires nationaux. Il est prévu de préparer un rapport BIPM sur la comparaison et d'en publier un résumé dans une revue scientifique.

2. Installation au BIPM d'une source intense de neutrons de 14 MeV

Lors de sa réunion de 1977, la Section III du CCEMRI a recommandé l'installation au BIPM d'une source intense, délivrant 10^{11} neutrons de 14 MeV par seconde, pour lui permettre de comparer les instruments de référence utilisés en thérapie neutronique. Cette source servirait de référence pour les neutrons rapides, comme la source intense de ^{60}Co sert de référence pour les rayonnements X et γ utilisés en thérapie. Elle permettrait au BIPM de jouer un rôle directeur dans le domaine des étalons de dosimétrie neutronique. Etant donné que la comparaison de mesures de débit de fluence de neutrons rapides monocinétiques n'est pas encore terminée, ce travail ne commencera qu'en janvier 1978 ; on pense qu'il durera environ deux ans.

3. Comparaison internationale de sources de neutrons de ^{252}Cf

La Section III a également décidé en 1977 d'organiser une comparaison internationale de mesures du taux d'émission d'une source de neutrons à fission spontanée de ^{252}Cf pour les raisons suivantes :

- a) quinze ans se sont écoulés depuis la comparaison d'une source Ra-Be (α, n) organisée par le BIPM et l'exactitude des mesures de sources neutroniques s'est bien améliorée depuis ;
- b) une comparaison des mesures par la méthode du bain de manganèse, à l'aide d'une source voyageuse, est souhaitable en raison de l'intérêt porté à $\bar{\nu}$, nombre moyen de neutrons émis par fission, dans le cas du ^{252}Cf et de la relation étroite qui existe entre la détermination de $\bar{\nu}$ et les mesures effectuées par la méthode du bain de manganèse ;
- c) les sources de ^{252}Cf étant très couramment employées comme étalons neutroniques, il est important que les laboratoires

nationaux soient capables de les étalonner avec une bonne exactitude.

La préparation de la comparaison, qui sera prise en charge par la Section III plutôt que par le personnel du BIPM, sera faite dans la seconde moitié de 1977 et la comparaison elle-même aura lieu en 1978-1979.

4. Essai de nouveaux instruments de transfert pour la comparaison internationale de débits de fluence de neutrons rapides monocinétiques

Lors de sa réunion de 1977, la Section III a estimé qu'avant d'entreprendre une nouvelle comparaison il serait souhaitable de faire progresser les techniques de mesure de débit de fluence de neutrons et les instruments de transfert. Avant la prochaine réunion de la Section III en 1979, les laboratoires nationaux vont faire des essais avec de nouveaux instruments de transfert, y compris des instruments ayant un bon temps de résolution et une chambre à fission susceptibles d'être utilisés dans des comparaisons comprenant des accélérateurs linéaires. On pourra alors envisager d'organiser une nouvelle comparaison aux énergies de neutrons suivantes : 144 keV, 565 keV, 2,5 MeV, 5,0 MeV et 14,8 MeV.

1^{er} septembre 1977

E. Ambler

Président du CCEMRI

TABLEAU II

Résumé du programme de travail et des réalisations correspondantes

CCEMRI, 1975-1977

Programme de travail envisagé

Réalisations

Section I - RAYONS X ET γ , ÉLECTRONS

Extension des comparaisons de mesures d'exposition à d'autres laboratoires et poursuite de comparaisons périodiques pour tous les laboratoires nationaux.

Comparaisons d'instruments de transfert du NBS et du NPRL effectuées dans le domaine de 100 à 250 kV (BIPM).

Acquisition d'une source intense de ^{60}Co ; comparaison de mesures de dose absorbée avec les laboratoires nationaux.

Source installée ; comparaisons effectuées avec le NBS et le LMRI (CCEMRI et BIPM).

Poursuite de l'étude des corrections d'humidité à appliquer aux mesures utilisant des chambres d'ionisation.

Nouvelles mesures de correction d'humidité effectuées par le PKNM avec des chambres à parois d'air et par le RIV avec des chambres à cavité. Explication du désaccord et adoption des facteurs de correction à appliquer (CCEMRI).

Section II - MESURE DES RADIONUCLÉIDES

Achèvement de la série de rapports sur la métrologie des radionucléides.

Deux monographies terminées (Procedures for accurately diluting and dispensing radioactive sources - The detection and estimation of spurious pulses). Comme conséquence de l'intérêt porté par le CCEMRI aux principes de la mesure des coïncidences, un article a été préparé sur le sujet (CCEMRI).

Installation et mise en oeuvre de chambres d'ionisation de référence pour comparaison pérenne d'étalons d'activité.

Mise en oeuvre des chambres. Onze laboratoires participent au système de référence ; on espère que d'autres s'y joindront (BIPM).

Comparaison internationale de quelques radionucléides tels que ^{134}Cs et ^{139}Ce .

Comparaison internationale à grande échelle de ^{139}Ce terminée. Comparaisons restreintes de ^{134}Cs et de ^{57}Co terminées. Projet de comparaison à grande échelle de ^{134}Cs et de ^{137}Cs pour 1978 et d'une comparaison restreinte de ^{55}Fe (CCEMRI).

Section III - MESURES NEUTRONIQUES

Essais d'instruments de transfert pour une comparaison de mesures de débit de fluence de neutrons rapides monocinétiques.

Essais achevés en 1975 (CCEMRI).

Comparaison de mesures de débit de fluence de neutrons à cinq énergies (250 keV, 565 keV, 2,2 MeV, 2,5 MeV et 14,8 MeV).

Comparaison presque terminée avec participation de neuf laboratoires ; rapport préliminaire ; fin de la comparaison en 1977 (BIPM).

Mise en service d'un faisceau étalonné de neutrons monocinétiques à 14,7 MeV.

Achevée (BIPM).

Analyse de la comparaison internationale de dosimétrie neutronique (ICRU).

Achevée ; rapport ICRU sous presse (BIPM).

TABLEAU III

Section II - Mesure des Radionucléides (Groupes de travail et rapports)

<u>Groupes de travail</u>	<u>Rapports proposés</u>	<u>Situation</u>
1. Problèmes de la micropesée.	Intercomparison of small mass metrology.	Terminé. Rapport BIPM-73/7.
2. Méthodes exactes pour la dilution et l'étalonnage des solutions radioactives.	Procedures for accurately diluting and dispensing radioactive solutions.	Terminé. Monographie BIPM-1.
3. Définition de l'activité.	Rapport final préparé.	En discussion à l'ICRU.
4. Comparaisons futures de radionucléides.	Report on the international comparison of activity measurements of a solution of ^{139}Ce .	Terminé. Rapport BIPM-77/4 (projet).
	Comparaison restreinte de ^{57}Co .	Comparaison terminée. Rapport à faire par le NPL.
	Comparaison de ^{134}Cs - ^{137}Cs .	Comparaison restreinte terminée. Comparaison à grande échelle en 1978.
5. Détection et mesure des impulsions secondaires.	The detection and estimation of spurious pulses.	Terminé. Monographie BIPM-2.
6. Possibilité de comptage par scintillateurs liquides.	Quatre projets de rapports de qualité inégale.	Monographie BIPM à préparer.
7. Mesure du taux de désintégration dans le cas de nucléides à schéma de désintégration complexe.	Aucun.	Abandonné.
8. Mesures par coïncidences sur le ^{203}Hg .	Aucun.	Abandonné.
9. Principes de la méthode de comptage par coïncidences.	Cox and Isham, A bivariate point process connected with electronic counters.	Publié dans <i>Proc. Roy. Society, A 356</i> , 1977, pp. 149-160.
	Intercomparison of high-count-rate ^{60}Co sources.	Rapport BIPM en préparation.
10. Métrologie des nucléides à capture électronique pure.		Comparaison restreinte de ^{55}Fe à organiser par le NPL.
11. Techniques de référence pour le contrôle des émetteurs β .	Aucun.	Abandonné.

TABLEAU IV

Programme des travaux du Laboratoire des Rayonnements Ionisants du BIPM

Première priorité

Deuxième priorité

Exposition X, γ ; dose absorbée

1. Travaux pérennes

- Comparaisons internationales de mesures de dose absorbée (^{60}Co).
- Comparaisons internationales d'étalons d'exposition (rayons X 10-50 kV, 100-250 kV, rayons γ du ^{60}Co).
- Mesure du kerma dans l'air.
- Etudes concernant la mesure de fluence de photons et de sa distribution spectrale.

2. Travaux de recherche

- Etude des facteurs de correction des étalons d'exposition et de dose absorbée.
- Mesure de l'énergie moyenne nécessaire pour produire une paire d'ions dans un gaz (\bar{W}).

Etalons d'activité

1. Travaux pérennes

- Système international de référence de mesure d'activité d'émetteurs de rayons γ .
- Préparation et certification de sources solides, minces et transportables (^{60}Co , ^{54}Mn , ...).
- Etude des particularités de mesures (^{137}Cs , ^{85}Sr , ...).
- Etude d'autres méthodes pour les mesures d'activité (p. ex. technique de corrélation).

2. Travaux de recherche

- Mise au point et analyse de comparaisons internationales (^{134}Cs , ^{137}Cs , ...).
- Etude des statistiques de comptage.

Mesures neutroniques

1. Travaux pérennes

- Mesure de sources de neutrons par la méthode du bain de manganèse.
- Mesure du débit de fluence d'un faisceau monocinétique de neutrons de 14 MeV.
- Participation aux mesures comparatives d'une source intense de ^{252}Cf .
- Etude et amélioration des instruments de transfert pour les mesures de débit de fluence de neutrons rapides.

2. Travaux de recherche

- Analyse de la comparaison internationale de mesures de débit de fluence de neutrons rapides monocinétiques (1974-1977).
- Etude en vue de la réalisation d'une source intense pour la dosimétrie des neutrons rapides (14 MeV).
- Mesure d'une source de ^{252}Cf .

RAPPORT
DU
COMITÉ CONSULTATIF
DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE
(9^e Session — 1977)

AU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

par E.J. GILLHAM, Rapporteur

Résumé.— En vue d'éviter la prolifération des unités ayant des noms spéciaux pour les grandeurs photobiologiques, le CCPR recommande de considérer, dans chaque cas, la fonction spectrale de pondération comme sans dimension et d'utiliser l'unité de la grandeur physique correspondante ; cependant, en raison des habitudes acquises et de l'utilisation très répandue de l'unité photométrique, le CCPR admet que celle-ci puisse faire exception à cette règle.

Le CCPR propose une nouvelle définition du lumen, de préférence à une nouvelle définition de la candela, pour tous les types de vision ; dans cette nouvelle définition le lumen serait rattaché directement au watt. Un document explicatif sur les unités et les grandeurs photométriques doit être préparé pour accompagner les recommandations concernant la nouvelle définition.

Le CCPR considère ensuite les progrès obtenus en radiométrie absolue, sur les filtres $V(\lambda)$ et sur les lampes étalons, ainsi que les travaux réalisés sous l'égide de la CIE.

Après une revue des travaux en cours ou en projet dans les laboratoires nationaux, le CCPR décide d'organiser une comparaison de mesures d'éclairement lumineux ; on fera circuler des photopiles au silicium corrigées suivant $V(\lambda)$ à l'aide de filtres.

Summary.— In order to avoid the proliferation of units having special names for photobiological quantities, CCPR recommends that the spectral weighting function be considered dimensionless and that the unit for the corresponding physical quantity be used. However, owing to deep-rooted habits and widespread usage, the CCPR admits that the unit for photometry may remain an exception.

CCPR proposes a new definition of the lumen for the different types of vision, in preference to a new definition of the candela. In this new definition the lumen would be related directly to the watt. An explanatory paper on the photometric quantities and their units is to be prepared and will be given with the recommendations regarding the new definition.

The progress in absolute radiometry on $V(\lambda)$ filters and on standard lamps is then reviewed by the CCPR together with work carried under the auspices of CIE.

After a review of the current or planned work of the national laboratories, CCPR decided to organize a comparison of illuminance measurements ; silicon photocells with $V(\lambda)$ filters will be circulated.

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR) s'est réuni pour sa neuvième session au Bureau International des Poids et Mesures, à Sèvres, où il a tenu quatre séances les mercredi 7 et jeudi 8 septembre 1977.

Etaient présents :

A. MARÉCHAL, membre du CIPM, président du CCPR.*

Les délégués des laboratoires membres :

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung
[ASMW], Berlin (S. NÜNDEL).

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

Conseil National de Recherches [NRC], Ottawa
(G. WYSZECKI, C.L. SANDERS).

Electrotechnical Laboratory [ETL], Tokyo (M. SUZUKI,
M. NISHI).

National Bureau of Standards [NBS], Washington
(K.G. KESSLER, H.J. KOSTKOWSKI, J. GEIST).

National Measurement Laboratory [NML], Chippendale
(W.R. BLEVIN).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington
(E.J. GILLHAM, O.C. JONES).

National Physical Research Laboratory [NPRL], Pretoria
(K. HENGSTBERGER).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braun-
schweig (G. BAUER, K. BISCHOFF, D. FÖRSTE).

Les membres nominativement désignés :

L. PLAZA (Madrid)

F. ROTTER (Wien).

* Mr Maréchal n'a pu assister qu'à la première et à la troisième séances ; les deux autres séances ont été présidées par Mr Terrien.

Le directeur du BIPM (J. TERRIEN).

Invités :

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris
[IEN], Turin (P. SOARDO).
C. FRÖHLICH (Davos).
E. INGELSTAM (Stockholm).

Assistaient aussi à la session : P. GIACOMO, sous-
directeur du BIPM , T.J. QUINN et J. BONHOURE (BIPM).

Absents : Institut de Métrologie D.I. Mendéléev [IMM],
Leningrad ; J.M. OTERO (Madrid) et K. YOSHIÉ (Tokyo),
membres nominativement désignés.

Le Président ouvre la séance ; Mr Gillham est désigné comme
rapporteur, assisté de Mr Bonhoure comme secrétaire.

1. DÉFINITION DES UNITÉS ET DES GRANDEURS COMPORTANT UN FACTEUR BIOLOGIQUE

Le Président ouvre la discussion sur ce sujet ; les grandeurs de ce type peuvent ne pas être liées de façon linéaire à leur effet biologique ou ne pas satisfaire à la condition nécessaire d'additivité ; les inclure dans le SI risque de nuire à sa réputation dans le monde scientifique. Mr Terrien répond que le SI n'est pas destiné uniquement à des buts scientifiques mais qu'il doit aussi répondre aux besoins de l'industrie, du commerce et de la vie courante en général. Mr Rotter fait remarquer que les grandeurs photométriques sont définies d'une façon qui permet de les mesurer sans ambiguïté, par des moyens purement physiques, de telle sorte que la question de linéarité ne se pose pas.

Mr Terrien se réfère à la note sur ce sujet (Annexe P 2) qu'il a préparée pour le CCU et à la proposition qu'elle contient : ne pas attribuer d'unités spéciales aux grandeurs photométriques et aux autres grandeurs biologiques, mais les exprimer en watts ou à l'aide des autres unités physiques du SI. On objecte parfois que remplacer le lumen par le watt empêcherait de faire la distinction entre le flux lumineux et le flux énergétique ; il est courant, dans le SI, que la même unité soit utilisée pour des grandeurs différentes et même incommen-

surables ; il n'appartient donc pas à l'unité d'indiquer la nature de la grandeur en question. En revanche, le lumen et la candela sont si fortement établis comme unités photométriques que leur suppression entraînerait de nombreux inconvénients et ne saurait être envisagée qu'à long terme. Ce point de vue est soutenu par MM. Kessler, Blevin et Jones ; il est accepté, avec de légères réserves, par le reste du CCPR.

Mr Kessler suggère que les unités pour les grandeurs biologiques soient incluses dans le SI mais sous forme d'un groupe à part, afin de conserver la distinction entre elles et les unités pour les grandeurs physiques. MM. Kessler et Jones soulèvent le problème du maintien d'unités spéciales en dehors du SI en raison des habitudes acquises de longue date. Mr Terrien répond que l'on a longuement discuté au sein du CCU de la possibilité d'avoir un groupe d'unités biologiques dans le SI. Les unités spéciales, bien que souvent commodes pour les spécialistes, sont une source de confusion pour les non-spécialistes ; leur inclusion dans le SI compromettrait sa simplicité et son universalité.

En ce qui concerne la compétence du CCPR pour conseiller le CCU sur la question des unités biologiques en général, Mr Blevin précise que l'expérience acquise en photométrie constitue un guide précieux pour la mesure des autres grandeurs comportant un facteur de pondération biologique. Le CCPR devrait insister et recommander que les grandeurs biologiques autres que photométriques soient, chaque fois que cela est possible, exprimées en watts ou en toute autre unité physique appropriée, l'unité photométrique n'étant pas soumise à cette règle pour le moment en raison des habitudes acquises. Mr Blevin rédige un projet de recommandation dans ce sens, projet qui est accepté par le CCPR (*Recommandation P 1* (1977), p. P 20).

2. REDEFINITION DE L'UNITÉ PHOTOMÉTRIQUE PAR RAPPORT AU WATT

Mr Terrien se réfère à la décision prise lors de la huitième session (1975), selon laquelle le CCPR devrait maintenant se mettre d'accord sur une valeur de K_m , efficacité lumineuse spectrale maximale, et recommander au CIPM de redéfinir l'unité photométrique à partir de cette valeur. Certains documents de travail, en particulier celui de la PTB (Annexe P 5), laissent à penser qu'on n'est pas encore prêt pour cette décision.

Mr Bauer répond que des mesures récentes de K_m faites à la PTB donnent une valeur moyenne de 683,6 lm/W, en bon accord avec la valeur de 683 lm/W calculée à partir de la valeur actuellement admise pour la température de l'étalon primaire (2042 K). Cependant, la relation entre les différentes échelles nationales, aussi bien photométriques que radiométriques, reste entachée d'une incertitude considérable ; il serait prématuré de redéfinir l'unité photométrique tant que cette incertitude n'a pas été réduite grâce à de nouvelles comparaisons internationales. Mr Bauer n'est toutefois pas opposé à la promulgation d'une valeur de K_m acceptée sur le plan international.

Mr Terrien, citant le précédent de valeurs fixées pour la vitesse de la lumière et pour d'autres constantes physiques, pense que cela pourrait parfaitement aller de pair avec le maintien de la définition actuelle. MM. Hengstberger et Jones insistent sur les avantages d'une valeur convenue pour K_m , en attendant une nouvelle définition de l'unité photométrique.

La discussion s'engage sur l'opportunité d'une nouvelle définition de l'unité photométrique. Mr Jones fait remarquer que la réalisation de l'unité photométrique risque d'être moins reproductible avec la nouvelle définition qu'avec la définition actuellement en vigueur ; il se réfère à la différence d'environ 1,5 % entre les valeurs de K_m obtenues par des mesures sur des lampes étalons photométriques et celles obtenues, tant au NPL qu'à la PTB, par des mesures sur des corps noirs de températures connues. Mr Terrien souligne que la facilité ou la difficulté de réalisation n'est pas une considération primordiale pour la définition d'une unité.

Mr Blevin remarque que la redéfinition de l'unité photométrique ne nécessiterait pas un changement brutal des échelles photométriques nationales ; tout laboratoire national qui ne désirerait pas rendre effective la nouvelle définition immédiatement pourrait continuer, pendant un certain temps, à conserver son échelle photométrique comme par le passé en s'appuyant sur des groupes de lampes étalons. Mr Terrien fait aussi remarquer qu'avec la définition actuelle, il semble qu'il y ait peu d'espoir d'améliorer notablement l'exactitude de la réalisation, alors que la nouvelle définition élargit la gamme des méthodes dont on dispose pour sa réalisation et ouvre la voie au progrès.

Mr Terrien demande ensuite si, compte tenu des réserves qui ont été exprimées, les membres du CCPR sont prêts à confirmer

les décisions prises à la session de 1975 concernant la redéfinition de l'unité photométrique.

A l'unanimité, le CCPR confirme la Recommandation P 1 (1975) qui propose de redéfinir l'unité photométrique en adoptant une relation convenue entre le lumen et le watt, et la Recommandation P 3 (1975) qui propose de spécifier la fréquence, plutôt que la longueur d'onde, de la radiation monochromatique pour laquelle cette relation sera établie.

Mr Blevin ouvre la discussion sur la Recommandation P 2 (1975) qui propose le remplacement de la candela par le lumen comme unité de base du SI; il craint que cette recommandation ne compromette le changement plus fondamental proposé dans P 1 (1975). Si une redéfinition du lumen est rejetée, une redéfinition de la candela doit alors être mise en avant. Mr Terrien estime que le remplacement de l'une des unités de base du SI - à ne pas confondre avec le changement de sa définition - risque fort de ne pas être acceptable ; il pense lui aussi qu'il faut préparer une recommandation de rechange. MM. Kessler et Blevin suggèrent que la recommandation concernant la redéfinition de la candela soit rédigée de façon telle qu'il reste bien entendu qu'un éventuel passage au lumen est souhaitable.

Un groupe de travail, comprenant MM. Blevin, Kessler, Wyszecski et Giacomo, est chargé de préparer des projets de recommandations selon ces directives. Après accord sur la meilleure valeur de K_m (voir le point suivant) et après légère modification, les *Recommandations* de 1977 P 2, P 3, P 4 sont adoptées à l'unanimité (voir p. P 20).

3. VALEUR RECOMMANDÉE DE K_m

A la demande de Mr Terrien, les membres du CCPR indiquent leur préférence pour les valeurs suivantes de K_m :

NML : Les étalons actuels d'intensité lumineuse du NML sont fondés sur la valeur 682 lm/W. Toutefois, d'après de récentes mesures goniophotométriques, il semble que les étalons de flux du NML soient mal reliés aux étalons d'intensité et correspondent à la valeur de 686 lm/W, si bien qu'une valeur comprise entre 682 et 686 lm/W serait acceptable. Préférence : 682 lm/W.

PTB : On a récemment mesuré K_m au moyen de récepteurs absolus $V(\lambda)$ ainsi que par spectroradiométrie. L'échelle photo-

métrique est donc représentée par une nouvelle réalisation de la candela conforme à la définition actuelle.

On a utilisé deux types de récepteurs $V(\lambda)$: un récepteur absolu avec un filtre $V(\lambda)$ de transmission spectrale connue et un récepteur commercial $V(\lambda)$ dont on a mesuré la sensibilité spectrale (absolue).

Les résultats des mesures avec les différents récepteurs $V(\lambda)$ sont en bon accord, alors que la valeur de K_m obtenue par spectroradiométrie est plus petite, de 1,5 % environ.

Jusqu'à maintenant, on ignore d'où provient cette différence, mais l'ETL et le NPL ont observé des écarts semblables (Doc. CCPR/75-16), confirmés par Mr Suzuki et Mr Jones, bien que cela n'ait pas été mentionné dans le rapport de 1975 ; la valeur obtenue pour K_m avec les récepteurs $V(\lambda)$ est de 683,6 lm/W. Préférence : 683 lm/W.

NPL : Les mesures de K_m faites en 1963 et en 1964 en utilisant des thermopiles étalonnées et des étalons d'intensité à 2042 K et 2853 K ont donné une valeur moyenne de 686 lm/W en fonction de la candela réalisée au NPL ; ceci équivaut à une valeur de 682 lm/W en fonction de la réalisation moyenne internationale de la candela. Préférence : 683 lm/W.

NBS : On a déterminé K_m par des mesures spectroradiométriques fondées respectivement sur les étalons d'intensité ou de flux lumineux du NBS et sur les étalons d'éclairement énergétique spectral du NBS, eux-mêmes dérivés de l'échelle de température (à l'aide d'un corps noir). La valeur moyenne est de 684 lm/W. Préférence 684 lm/W.

ETL : Des mesures avec des radiomètres absolus ont donné la valeur moyenne de 683 lm/W en fonction de la réalisation moyenne internationale de la candela. Préférence : 683 lm/W.

NRC : La moyenne des valeurs obtenues avec quatre radiomètres absolus différents est de 675 lm/W en fonction de la candela réalisée au NRC ; cette dernière a été établie en appliquant les corrections recommandées par Sanders à l'étalon primaire. En fonction de la moyenne internationale, la valeur obtenue est 682 lm/W.

NPRL : Une récente série de mesures a donné la valeur moyenne de 681 lm/W, mais 683 lm/W serait acceptable. Préférence : 681 lm/W.

ASMW : La valeur de 683 lm/W est en bon accord avec nos mesures les plus récentes. Préférence : 683 lm/W.

Le CCPR prend aussi note de la valeur de K_m donnée par le NIM* (Annexe P 16). La mesure a été faite avec des radiomètres absolus, soit à disque, soit à cavité, sur des étalons d'intensité à 2859 K, en utilisant un filtre liquide $V(\lambda)$; elle a donné comme résultat 684 lm/W avec une incertitude estimée de $\pm 0,74$ %. Les étalons d'intensité ont été établis de façon indépendante en réalisant l'étalon primaire ; leur rattachement aux autres échelles nationales n'est pas connu. Toutefois, le CCPR estime que la mesure semble avoir été effectuée avec beaucoup de soin et qu'il convient d'attribuer un certain poids au résultat obtenu.

Mr Terrien pense que la valeur de 683 lm/W est un compromis satisfaisant entre les diverses préférences. Cette valeur est finalement adoptée dans les recommandations du CCPR (voir p. P 21).

4. DÉFINITION DES GRANDEURS SCOTOPIQUES

La discussion porte ensuite sur les répercussions de la nouvelle définition de la candela et du lumen en ce qui concerne la mesure des grandeurs scotopiques. La nouvelle définition est conçue pour assurer la continuité de l'unité pour les grandeurs photopiques ; si l'on veut qu'elle s'applique aussi à l'unité pour les mesures scotopiques, comme c'est le cas de la définition actuelle, alors l'échelle de mesure scotopique changera d'environ 3 %. Mr Blevin considère qu'un tel changement est acceptable eu égard à l'avantage de n'avoir qu'une seule unité pour les mesures photopiques et scotopiques.

En revanche, Mr Jones estime que cela pourrait avoir des conséquences indésirables dans certaines des applications les plus délicates de la photométrie aux faibles niveaux de luminance. Mr Wyszecski est d'accord et suggère une définition séparée de l'unité scotopique, avec une valeur différente de K_m pour assurer la continuité avec l'unité actuelle.

Toutefois, on accepte finalement que la valeur de 683 lm/W s'applique indifféremment aux grandeurs photopiques, scotopiques

* National Institute of Metrology (Pékin).

et mésopiques ; cela est explicite dans les Recommandations P 2 (1977) et P 3 (1977), et implicite dans la Recommandation P 4 (1977).

5. DOCUMENT EXPLICATIF SUR LES UNITÉS ET LES GRANDEURS PHOTOMÉTRIQUES

Lors de sa session de 1975, le CCPR avait demandé la rédaction d'un document explicatif pour accompagner les recommandations concernant la redéfinition de l'unité photométrique ; ce document a été rédigé par Mr Wyszecski en collaboration avec MM. Kessler et Blevin ; il a été envoyé aux membres du CCPR en août 1976. Mr Wyszecski explique qu'il est conçu comme un exposé concis, plutôt qu'élémentaire, sur les grandeurs et les unités photométriques telles qu'elles apparaîtront à la lumière des nouvelles définitions. Les seuls commentaires sur ce document sont ceux rédigés par Mme Kartachevskaja (Annexe P 17) ; en l'absence d'autres commentaires, Mr Wyszecski conclut que le document reçoit l'approbation du CCPR. La mise en forme finale de ce document et sa publication doivent attendre les décisions du CIPM concernant la redéfinition de l'unité photométrique.

6. PROGRÈS EN RADIOMÉTRIE ABSOLUE

Les récents travaux faits dans ce domaine à la PTB ont été consacrés à la mise au point de radiomètres absolus à disque ou à cavité pour des mesures de rayonnement de lasers fonctionnant en continu ou par impulsion. Des mesures à des niveaux de puissance allant jusqu'à 1 kW sont possibles en utilisant des récepteurs à cavité conique et à parois spéculairement réfléchissantes. Une comparaison a été faite entre des radiomètres de ce type et ceux qui sont utilisés pour les mesures à faible puissance ; cette comparaison, effectuée à un niveau de puissance de 200 mW, a montré que les deux types de récepteurs sont en accord à 2 % près. Une comparaison internationale de mesures portant sur le rayonnement du laser à He-Ne, à 633 nm, a été organisée par l'ETL sous les auspices du CCE ; elle a montré que les quatre laboratoires participants, PTB, NPL, ETL et NBS, sont en accord à 1 % près.

Au PMO*, on a mis au point un certain nombre de radiomètres

* Physikalisch-Meteorologisches Observatorium (Davos).

absolus, essentiellement du type à cavité, comme étalons de mesure d'éclairement énergétique solaire. On s'est efforcé d'assurer une exactitude élevée, puisque c'est la seule façon efficace de s'assurer de la stabilité à long terme des mesures de rayonnements dont on a besoin dans les travaux météorologiques. Des mesures comparatives faites avec neuf de ces radiomètres concordent à 0,2 % près et on pense que l'échelle établie pour les mesures d'éclairement énergétique solaire a une incertitude inférieure à 0,3 %.

Au NPRL, les travaux ont été centrés sur la mise au point de radiomètres absolus du type bolométrique. L'instrument le plus récent comporte un récepteur constitué d'un disque en mica de 19 mm de diamètre, revêtu sur chaque face d'une résistance en double spirale formée d'une couche mince d'or déposée par évaporation sous vide ; l'une sert d'élément thermométrique, l'autre sert d'élément chauffant. Le récepteur est revêtu de noir 3M ou de noir d'or déposé par évaporation ; on utilise un réflecteur hémisphérique pour augmenter le facteur d'absorption. La résolution est d'environ 30 nW/cm^2 en fonctionnement dans l'air.

Des instruments de ce type constituent la base d'un système complet de mesure pour établir et conserver une échelle d'intensité lumineuse ainsi que pour les étalonnages. D'autres recherches actuellement en cours comprennent une étude de la correction d'échauffement des fils dans les radiomètres absolus et une étude plus générale de l'exactitude avec laquelle on peut déterminer les facteurs de correction. Une version du radiomètre absolu susceptible d'être commercialisée est en cours de réalisation.

Au NML, au cours des deux dernières années, il y a eu peu de travaux pour améliorer l'exactitude ultime en radiométrie absolue ; l'attention s'est portée sur l'utilisation des matériaux pyroélectriques pour les mesures absolues à des niveaux modérés d'exactitude. On a trouvé que ce qui convient le mieux à cet usage ce sont des films plastiques de fluorure de polyvinylidène ; on en a utilisé dans un radiomètre étudié en vue de l'usage courant au niveau d'exactitude de 1 à 2 %. Le radiomètre fonctionne avec un rayonnement modulé et la principale limitation de l'exactitude vient de la nature incertaine du flux de chaleur alternatif. On a par conséquent envisagé de le faire fonctionner sur le mode continu mais cela risque d'être exclu à cause d'effets d'hystérésis dans le matériau pyroélectrique.

Au NBS, on a poursuivi les travaux de mise au point et d'étude des radiomètres absolus fondés sur l'utilisation du sulfate de triglycine (TGS) comme matériau pyroélectrique. On a découvert que les indications de ces instruments peuvent présenter des variations discontinues atteignant jusqu'à 0,4 % ; les causes de ces variations sont inconnues mais elles peuvent être liées à des effets de l'humidité. Néanmoins, ces radiomètres sont des étalons de transfert utiles et on les a utilisés pour comparer les récepteurs étalons du NBS avec ceux de la PTB et du PMO. Les résultats de cette comparaison ont montré que ces trois laboratoires sont en accord à 0,9 % près.

Au NRC, des travaux sur les radiomètres absolus ont commencé il y a environ trois ans. On a maintenant construit quatre prototypes qui fonctionnent de façon satisfaisante. On a réussi à obtenir une sensibilité uniforme sur la surface du récepteur, mais on n'a pas encore trouvé une méthode satisfaisante pour déterminer la résistance thermique du revêtement noir 3M. A cause de la sensibilité assez faible de ces instruments, on a effectué les mesures de K_m avec une lampe de 500 W au lieu des étalons d'intensité Wi40.

Mr Quinn décrit le radiomètre absolu, fonctionnant à la température de l'hélium liquide, dont la mise au point est en cours au NPL dans le but d'étudier l'échelle de température thermodynamique dans le domaine de 0 à 100 °C au moyen de mesures du rayonnement total. Bien que l'on n'ait besoin pour cela que de mesures relatives, il est devenu évident au stade du projet que l'on pouvait, sans grand effort supplémentaire, faire de ce radiomètre un instrument absolu et que cela serait la meilleure façon d'assurer l'exactitude des mesures relatives.

Ce radiomètre étant exposé au rayonnement d'un corps noir à 0 °C, la puissance reçue par le récepteur est d'environ 200 μ W; la résistance thermique entre le récepteur et son piège thermique à 2 K est telle que l'élévation de température est d'environ 1 K. Comme on peut mesurer la température du récepteur à environ 1 μ K près et comme la température du piège thermique est stable à environ 2 μ K près, on peut s'attendre à ce que la précision de la mesure soit de l'ordre de quelques 10^{-6} . La faible capacité thermique du récepteur et sa faible déperdition superficielle de chaleur sont deux facteurs particulièrement favorables à l'exactitude qui résultent du fonctionnement à la température de l'hélium liquide.

Le radiomètre est achevé, il fonctionne de façon satisfai-

sante ; on est en train de monter la partie source (corps noir) et on espère obtenir en 1978 les résultats de la première étape du programme de mesure : une redétermination de la constante du rayonnement de Stefan-Boltzmann.

7. FILTRES $V(\lambda)$

Au sujet des différents verres que l'on a mis au point au NPRL pour ajuster la courbe de réponse des récepteurs sur $V(\lambda)$ ou sur les autres fonctions de pondération, Mr Hengstberger précise que l'exploitation de ces verres est retardée faute de moyens pour les travaux d'optique mais qu'il existe maintenant une possibilité de production commerciale. Mr Jones mentionne le filtre en verre à quatre composants mis au point au NPL pour corriger les cellules photoémissives ; ils permettent de reproduire la courbe $V(\lambda)$ avec une erreur moyenne inférieure à 1 % sur tout le spectre. Mr Geist signale qu'il existe à l'heure actuelle un certain nombre de matériaux plastiques qui pourraient servir à corriger les cellules au silicium.

Mr Sanders indique que la sensibilité des filtres $V(\lambda)$ aux variations de température a suscité quelques difficultés pendant les mesures de K_m faites au NRC. Mr Blevin dit que les filtres utilisés au NML, qui sont en verre industriel, ont un facteur de transmission global presque indépendant de la température, l'accroissement de la transmission spectrale dans une partie du spectre étant contrebalancé par une diminution ailleurs.

8. AMÉLIORATION DES LAMPES ÉTALONS

Mr Förste mentionne le type le plus récent de lampe Wi40/41 fabriqué par Osram. La première étape de l'évolution de cette lampe, par rapport à sa forme originelle, a consisté à enlever les crochets supports qui constituaient la cause principale d'instabilité. De fréquentes cassures du filament sont alors survenues, mais on a maintenant remédié à ce défaut en améliorant la façon de souder le filament aux arrivées de courant. La nouvelle lampe devrait donner toute satisfaction comme étalon d'intensité lumineuse pour les comparaisons internationales.

Au NPL, les travaux sur l'amélioration des lampes ont porté essentiellement sur les fluctuations de la puissance rayonnée par les lampes étalons remplies de gaz, fluctuations dues aux instabilités des courants de convection du gaz de remplissage.

L'utilisation d'une cheminée pour éliminer ces fluctuations, (Voir Rapport de 1975) est maintenant abandonnée ; on a en effet découvert que, dans une lampe à ampoule cylindrique munie de tubes latéraux de visée, telle que la lampe à ruban utilisée au NPL comme étalon de luminance énergétique spectrale, on peut obtenir le même résultat en faisant passer les supports du filament à travers le haut de l'ampoule et non à travers le bas. La base reste munie d'un culot, uniquement pour permettre de monter la lampe de façon normale.

La même méthode s'est avérée efficace avec la lampe à courant élevé décrite par Clarke. On a étudié la possibilité d'améliorer la vitesse de vieillissement des étalons de luminance énergétique en les remplissant de krypton ou de xénon plutôt que d'argon ; la durée de vie de la lampe est augmentée, mais il n'y a pas d'amélioration significative de la dérive, vraisemblablement parce que celle-ci est due essentiellement aux modifications de la surface du tungstène et non à l'évaporation.

9. TRAVAUX RÉALISÉS SOUS L'ÉGIDE DE LA CIE

Mr Sanders rend compte de l'état d'avancement de la comparaison internationale de mesures sur des cellules au silicium (sensibilité spectrale et linéarité) demandée par le TC-2.2 et organisée par le NRC. Les cellules au silicium, avec leurs amplificateurs, sont maintenant prêtes ; les dispositions détaillées pour la comparaison seront discutées à la prochaine session du TC-2.2 à Budapest (15-16 septembre 1977).

Le TC-1.2 a décidé de faire une nouvelle comparaison de lampes à vapeur de mercure à haute pression, comparaison qui est organisée par Mme Poppe (Hongrie).

Mr Jones dit que le document sur la spectroradiométrie préparé pour le TC-1.2 a encore été revu et approche maintenant de sa forme définitive. A l'origine ce devait être un guide des mesures sur les lampes fluorescentes, mais c'est devenu un exposé plus général des méthodes spectroradiométriques. Il a été envoyé à tous ceux que l'on savait être intéressés et l'on discutera à la réunion du TC-1.2 à Berlin (12-13 septembre 1977) de sa publication éventuelle par la CIE. Le projet de document de Mr Blevin sur les principes de la photométrie physique sera aussi examiné.

En réponse à une question de Mr Sanders sur la préparation du vocabulaire, Mr Bauer dit que les progrès sont lents,

car il est difficile de parvenir à un accord sur les termes et les définitions.

10. AUTRES TRAVAUX DE RECHERCHE DANS LES LABORATOIRES NATIONAUX

A l'ETL, on a établi des étalons d'éclairement énergétique spectral pour l'ultraviolet en utilisant le rayonnement synchrotron. Dans le domaine de l'ultraviolet à vide, on est en train d'établir des récepteurs étalons en s'inspirant de ce que Madden a mis au point au NBS. Un corps noir en carbure de silicium, mis au point pour des recherches sur l'émission spectrale infrarouge, fonctionne à une température d'environ 1000 °C ; la température est reproductible à 0,1 % près avec une alimentation électrique stabilisée.

A l'ASMW, il y a une demande croissante de l'industrie pour l'étalonnage des diodes électroluminescentes ; de meilleurs étalons sont absolument nécessaires pour effectuer ces étalonnages.

Au NBS, les recherches sur les récepteurs étalons ont comporté une étude de l'actinomètre d'usage courant au ferrioxalate de potassium. Dans l'ultraviolet, l'exactitude de cet instrument est assez bonne, mais on a trouvé de grosses erreurs dans le visible.

Dans le cadre de recherches sur des sources étalons, on a étalonné des lampes au deutérium pour les utiliser comme étalons d'éclairement énergétique spectral dans le domaine de longueur d'onde de 200-350 nm. On est en train de construire un équipement d'étalonnage transportable pour vérifier les mesures spectrales ; on a l'intention de le louer aux clients. Il comporte un spectroradiomètre relativement léger et une série de lampes étalonnées (lampes au tungstène, au deutérium et fluorescentes). On est aussi en train d'apporter des améliorations à la réalisation de l'échelle pyrométrique dans le but de réduire l'incertitude des étalons de rayonnement spectral à environ 0,3 % dans le visible et 1 % dans l'ultraviolet.

La dernière addition au manuel "d'auto-enseignement" du NBS sur la radiométrie est un chapitre sur les effets de polarisation en spectroradiométrie ; deux autres chapitres sont en préparation, l'un traitant de la largeur de bande passante des instruments et l'autre des problèmes spéciaux de spectroradiométrie dans l'ultraviolet.

Parlant des autres travaux de radiométrie au NBS, Mr Kessler cite les arcs à hydrogène et à argon mis au point par Wiese pour servir d'étalons de rayonnement dans l'ultraviolet et l'ultraviolet à vide. Les travaux sur les récepteurs étalons dans l'ultraviolet (Madden) comprennent l'utilisation de l'anneau de stockage du NBS pour les étalonnages, l'entretien d'une installation d'étalonnage de récepteurs et un contrat de la NASA pour un système d'étalonnage d'instruments. Celui-ci comprend la construction d'une grande chambre à vide permettant de faire tourner les instruments de façon à pouvoir étudier les effets de polarisation. Les travaux sur les mesures de puissance et d'énergie des lasers sont en bonne voie ; le NBS a pris part à la comparaison de mesures de puissance de lasers fonctionnant en continu organisée sous l'égide du CCE.

Au NPL, on a poursuivi les travaux de mise au point de l'arc à plasma d'argon stabilisé par effet de paroi comme étalon de rayonnement ultraviolet. L'arc fonctionne à une pression de 1,75 atmosphères et à des températures allant jusqu'à 14 000 K. Les mesures de température sont faites par observations spectroscopiques dans le visible ; en ajoutant des produits traceurs, tels que le carbone, on obtient des raies spectrales en milieu optiquement épais qui donnent, à différentes longueurs d'onde dans l'ultraviolet à vide, les luminances énergétiques calculables du corps noir. On a mesuré la luminance énergétique d'un certain nombre de ces raies dans le domaine de 165 nm à 200 nm, par comparaison à des lampes étalons au deutérium, elles-mêmes rattachées au rayonnement synchrotron ; il s'est avéré que les valeurs mesurées concordent avec les valeurs calculées à environ 2 % près.

Ces arcs, quand ils fonctionnent dans des conditions bien déterminées, sont très reproductibles ; on a l'intention de mettre au point un modèle de dimensions réduites pour contrôler à long terme les lampes étalons au deutérium et pour servir d'étalon de travail au-dessous de 165 nm, limite de longueur d'onde de la lampe au deutérium. On ne dispose plus du synchrotron de Daresbury pour les étalonnages primaires mais on s'est mis d'accord avec l'INM (Paris) sur un programme conjoint de recherches utilisant l'anneau de stockage de l'accélérateur d'Orsay, proche de Paris ; cela permettra de conserver les étalons existants et d'établir des étalons au-dessous de la limite actuelle de 165 nm.

En ce qui concerne les étalons photométriques, on prépare

actuellement le goniomètre du NPL pour mesurer à nouveau les étalons de flux à 2788 K, car on craint que leur valeur ne soit erronée. On a effectué une étude de l'influence de la fréquence du réseau de distribution sur le rendement des lampes fluorescentes et l'exactitude avec laquelle on peut spécifier et mesurer les conditions électriques de fonctionnement.

A la PTB, pour les travaux avec les étalons spectroradiométriques, on dispose maintenant d'un corps noir ayant un orifice de 1 cm de diamètre, qui fonctionne à des températures allant jusqu'à 3000 K. La révision, en 1971, de la température attribuée au corps noir à 2850 K a conduit à une modification de 20 à 30 K dans l'échelle de température de couleur de la PTB qui avait été établie en 1962-1963 et utilisée dans la comparaison internationale faite au BIPM en 1963-1964. En réponse à une remarque de Mr Blevin selon laquelle les mesures de température de couleur risquent bientôt d'être remplacées par des mesures de répartition spectrale, Mr Bauer dit qu'il existe encore beaucoup de demandes pour ces mesures de la part des industriels ; Mr Jones ajoute qu'au NPL l'échelle de température de couleur joue un rôle essentiel dans la conservation de l'échelle de répartition spectrale.

Toujours à la PTB, on a construit un nouveau goniophotomètre ; les récepteurs $V(\lambda)$ se déplacent sur une sphère de 5 m de diamètre autour de la source à étudier ; on peut ainsi déduire avec une grande exactitude le flux lumineux de n'importe quelle source à partir d'un étalon d'intensité. Etant donné les dimensions de l'instrument, on peut également mesurer des lampes tubulaires d'une longueur allant jusqu'à 2,5 m environ.

Les travaux se poursuivent à la PTB sur le synchrotron de 140 MeV et sur les arcs stabilisés. L'équipe de l'Institut de Berlin a mis au point une source à arc de petites dimensions et de manipulation très aisée. De plus, on a étalonné des lampes au deutérium par rapport au synchrotron DESY pour les utiliser comme étalons de transfert ; dans l'avenir, on pourra peut-être disposer, à Berlin, d'un anneau de stockage pour des travaux de ce type.

Au NML, on a consacré beaucoup d'efforts à concevoir et à faire réaliser de nouveaux équipements, tels que bancs optiques et tables antivibratoires, en prévision du prochain déménagement dans le nouveau laboratoire. On a mis en service un goniophotomètre semi-automatique de précision ; il est utilisé pour élucider le désaccord entre les échelles d'intensité et de flux

lumineux du NML. Un des travaux en cours est la mise au point d'un spectroradiomètre automatique contrôlé par ordinateur et destiné aux mesures de routine de rayonnement et de sensibilité spectraux. On utilise le spectromètre à transformée de Fourier à polarisation mis au point au NPL avec des détecteurs thermiques non sélectifs comme moyen indépendant pour établir des étalons de rayonnement spectral. L'exactitude obtenue est voisine de celle des méthodes habituelles. On applique aussi les méthodes de transformation de Fourier dans le domaine de l'infrarouge de 3 μm à 30 μm et dans le domaine submillimétrique de 50 μm à 2 mm.

L'INM met au point un radiomètre absolu dans lequel l'apport d'énergie électrique au récepteur s'effectue grâce à un faisceau d'électrons, de préférence à l'élément de chauffage habituel. On a fait avec succès des essais de ce nouveau principe avec des récepteurs de 1 mm et de 5 mm de diamètre, mais on n'a pas complètement résolu les problèmes liés à l'émission d'électrons secondaires.

L'INM possède maintenant des corps noirs pour les mesures pyrométriques aux points de l'or et du cuivre. Pour les travaux sur la luminance énergétique spectrale, on a mis au point un corps noir tubulaire en chromite de lanthane. Il est chauffé par passage direct du courant et peut fonctionner à des températures allant jusqu'à 1700 K. Avec un courant constant, la stabilité de la température est d'environ 0,2 K pendant la durée d'une mesure et d'environ 2 K d'une mesure à l'autre.

Au NPRL, on a commencé la construction d'un goniophotomètre et construit un spectrophotomètre automatique. On a aussi effectué des mesures de répartition spectrale énergétique de la lumière du jour au niveau de la mer, dans l'hémisphère sud (Durban) ; ces mesures ont été faites dans le domaine spectral 295-775 nm, sur une période d'une année environ. Le dépouillement des résultats est en cours.

Au NRC, des crédits importants destinés à l'automatisation de l'équipement ont permis de construire un spectroradiomètre automatique, à partir du monochromateur de McPherson de 1 m ; on projette aussi la construction d'un goniophotomètre. Pour répondre à l'intérêt soulevé actuellement par l'utilisation de l'énergie solaire, on a monté un appareillage automatisé pour mesurer la répartition spectrale du rayonnement du soleil et du ciel dans le domaine des longueurs d'onde de 295 nm à 3 μm .

Dans le domaine des recherches sur la vision, en collaboration avec le NBS, un programme est en cours pour étudier dans quelle mesure le système photométrique actuel est en accord avec ce que l'oeil perçoit. Des comparaisons visuelles de surfaces éclairées au moyen de différents types de lampes commerciales ont montré que, si les lampes diffèrent beaucoup en couleur, la corrélation entre la luminosité perçue et la luminance mesurée peut être très médiocre. De nouvelles mesures avec d'autres types de répartition spectrale sont actuellement en cours. On espère en fin de compte mettre au point un système photométrique mieux en accord avec la perception visuelle.

11. COMPARAISONS FUTURES D'ÉTALONS PHOTOMÉTRIQUES

On s'accorde pour dire qu'une comparaison internationale d'étalons d'intensité lumineuse à la température de couleur de 2853 K serait opportune, mais qu'il ne faut pas entreprendre au BIPM une comparaison à grande échelle tant que l'on n'a pas contrôlé la mise au point de la nouvelle génération de lampes étalons remplies de gaz. On considère comme une étape préliminaire fondamentale une comparaison pilote entre un petit nombre de laboratoires: elle constituera un banc d'essai réaliste de la robustesse des lampes et permettra de vérifier que la méthode de mesure choisie est satisfaisante.

Mr Bauer a déjà fortement recommandé d'effectuer des mesures comparatives de lampes et de récepteurs (Doc. CCPR/77-5, point 10) ; il précise que la PTB est prête à jouer le rôle de laboratoire pilote. Mr Geist rappelle la discussion qui s'est déroulée lors de la session de 1975. A l'époque on pensait que, pour comparer des échelles d'intensité lumineuse, une cellule au silicium et un filtre correcteur en verre constitueraient un instrument meilleur qu'une lampe étalon remplie de gaz. Le projet d'étudier cette possibilité au moyen d'une comparaison pilote préparée par le NML n'a pas été réalisé, en partie parce que l'attention s'est concentrée sur un autre aspect du fonctionnement des cellules au silicium, l'effet de l'irradiation dans l'ultraviolet. Toutefois, le NBS a maintenant construit des systèmes transportables de cellules au silicium, comportant l'électronique nécessaire pour le contrôle de la température et la lecture des résultats ; il a acquis une certaine expérience de leur emploi comme étalons de transfert à l'occasion de mesures faites récemment au NPL et à Davos.

On décide qu'une comparaison de récepteurs $V(\lambda)$ aura lieu entre un nombre restreint de laboratoires. Selon la suggestion de Mr Bauer, la PTB jouera le rôle de laboratoire pilote et on utilisera trois récepteurs commerciaux $V(\lambda)$ fabriqués par Lichtmesstechnik (Berlin).

On déterminera la sensibilité lumineuse de ces détecteurs pour une répartition spectrale correspondant à une température de couleur spécifiée ; on estime que 2800 K conviendra. Les laboratoires suivants expriment leur intention de prendre part à cette comparaison : BIPM, PTB, IEN, NPL, NBS, NPRL et NRC. Mr Kostkowski pense qu'étant donné le nombre de participants, il vaudrait mieux organiser deux comparaisons. Il suggère aussi que l'on fasse en même temps des essais sur la nouvelle lampe W1/40 décrite par Mr Förste, en en faisant circuler une avec chaque récepteur $V(\lambda)$; cette suggestion est acceptée. La PTB fournira les récepteurs et Mr Bischoff prendra les dispositions nécessaires dès que possible.

12. QUESTIONS DIVERSES

— Au sujet de la comparaison des mesures de puissance de lasers organisée par le CCE (CCE, 14^e session, 1975, p. E 11), Mr Bauer demande si les échanges d'informations sont suffisants entre ces deux Comités Consultatifs sur de telles questions d'intérêt commun. Mr Terrien suggère que toute comparaison future de ce genre soit organisée en liaison avec le CCPR et que ce point soit soulevé lors de la prochaine session du CCE.

— Le CCPR s'accorde pour trouver prématuré de fixer une date pour sa prochaine session.

*

Le Président félicite les membres du groupe de rédaction pour leur succès dans la préparation des nouvelles recommandations ; il remercie les autres membres du CCPR et clôt la session.

(14 novembre 1977)

R E C O M M A N D A T I O N S
du Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie
présentées
au Comité International des Poids et Mesures

Sur le nom des unités des grandeurs comportant un facteur biologique

RECOMMANDATION P 1 (1977) *

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie,
considérant

- que l'on doit mesurer de nombreuses grandeurs mettant en jeu des rayonnements électromagnétiques et des facteurs biologiques,

- que le nombre des unités SI ayant des noms spéciaux ne doit pas être augmenté sans des raisons impératives,

recommande

- qu'avant d'admettre dans le SI un nouveau nom spécial pour une unité d'une grandeur mettant en jeu des rayonnements électromagnétiques et des facteurs biologiques, on étudie attentivement la possibilité de choisir une unité SI existante. Par exemple, pour une grandeur résultant de la pondération d'une répartition spectrale de puissance énergétique par une fonction spectrale photobiologique, la fonction de pondération pourrait être choisie sans dimension et en conséquence la grandeur serait exprimée en watts.

Valeur de l'efficacité lumineuse spectrale

RECOMMANDATION P 2 (1977) **

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie,
considérant

- l'utilisation croissante des méthodes radiométriques pour mesurer des grandeurs photométriques,

- le besoin croissant d'assurer la compatibilité entre les mesures radiométriques et les mesures photométriques,

* Cette Recommandation a été transmise pour étude au Comité Consultatif des Unités, par le CIPM à sa 66^e session (septembre 1977).

** Cette Recommandation a été approuvée par le CIPM à sa 66^e session (septembre 1977).

- le désir des laboratoires nationaux d'assurer la continuité des valeurs des échelles photométriques,
- les valeurs de l'efficacité lumineuse spectrale considérées par les laboratoires nationaux comme assurant la meilleure continuité,

recommande l'emploi de la valeur 683 lumens par watt pour l'efficacité lumineuse spectrale d'une radiation monochromatique de fréquence $540,015\ 4 \times 10^{12}$ hertz, pour les visions photopique, mésopique et scotopique.

Définition du lumen ou de la candela

RECOMMANDATION P 3 (1977) *

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie, considérant à nouveau ses Recommandations P 1 (1975), P 2 (1975) et P 3 (1975), confirme ces Recommandations,
- considérant que l'adoption de la Recommandation P 2 (1975) rendra nécessaire d'introduire et de définir le lumen en tant qu'unité de base du SI en remplacement de la candela,
- considérant sa Recommandation P 2 (1977),
- et considérant qu'il est désirable d'avoir, comme précédemment, une seule définition de l'unité de base de la photométrie pour les visions photopique, mésopique et scotopique,

recommande que le lumen soit défini comme suit :

Le lumen est le flux lumineux d'un rayonnement monochromatique dont le flux énergétique est 1/683 watt et dont la fréquence est $540,015\ 4 \times 10^{12}$ hertz.

RECOMMANDATION P 4 (1977) *

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie, considérant
- le besoin urgent de relier les unités photométriques au watt,
- la difficulté éventuelle de remplacer à bref délai la candela par le lumen en tant qu'unité de base du SI pour la photométrie,

recommande s'il est nécessaire, à titre transitoire, de conserver la candela en tant qu'unité de base, que la candela soit définie de la manière suivante, compatible avec la Recommandation P 3 (1977) :

La candela est l'intensité lumineuse d'une source monochromatique qui émet un rayonnement de fréquence $540,015\ 4 \times 10^{12}$ hertz, dans une direction pour laquelle son intensité énergétique est 1/683 watt par stéradian.

RAPPORT

SUR LA RÉUNION CONCERNANT LES MASSES *

(23-24 novembre 1976)

par T.J. QUINN, Rapporteur

A la suite d'une proposition du Bureau International des Poids et Mesures, une réunion s'est tenue au Pavillon de Breteuil les 23 et 24 novembre 1976 pour faire le point sur différentes questions relatives à l'étude des masses.

Assistaient à cette réunion :

Les délégués des laboratoires suivants :

- Bureau Fédéral des Mesures et Métaux Précieux [BFMMP],
Belgrade, Yougoslavie (S. SPIRIDONVIĆ).
- Bureau Fédéral des Poids et Mesures [BIPM], Berne, Suisse
(J. G. ULRICH).
- Institut National de Métrologie du Conservatoire National
des Arts et Métiers [INM], Paris, France (P. RIETY).
- Istituto di Metrologia G. Colonnetti [IMGC], Turin,
Italie (M. PLASSA).
- Laboratoriet for Fundamental Metrologi [LFM], Lyngby,
Danemark (J. THOMAS).
- National Bureau of Standards [NBS], Washington, Etats-
Unis d'Amérique (P. E. PONTIUS et V. E. BOWER).

* Original en anglais disponible au BIPM ; traduction BIPM.

National Physical Laboratory [NPL], Teddington, Royaume-Uni (T.J. QUINN).

National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Tokyo, Japon (Y. KURITA).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig, République Fédérale d'Allemagne (M. KOCHSIEK).

Van Swinden Laboratorium [VSL], 's-Gravenhage, Pays-Bas (R. MUYLWIJK).

Le directeur du BIPM (J. TERRIEN).

Etaient également présents : P. GIACOMO, sous-directeur du BIPM, P. CARRE, A. SAKUMA, G. GIRARD, A. RYTZ (BIPM).

Monsieur Terrien, directeur du BIPM, présidant la réunion, ouvre les débats et accueille les représentants des laboratoires nationaux.

Mr Quinn est nommé rapporteur.

Le Président commence par rappeler dans quel contexte a été décidée cette réunion ; il se rapporte en particulier à la Résolution 3 de la 15^e CGPM :

"La Quinzième Conférence Générale des Poids et Mesures,

CONSIDERANT que l'unité de masse, et les unités de toutes les grandeurs qui dépendent de la masse, pour être réalisées exactement, nécessitent l'emploi du Prototype international du kilogramme en platine iridié conservé par le Bureau International des Poids et Mesures depuis 1889,

que pour le moment aucun moyen n'est en vue qui permettrait de définir l'unité de masse en termes de constantes atomiques avec une précision équivalente,

DEMANDE au Bureau International des Poids et Mesures et aux Laboratoires nationaux de poursuivre des études visant à améliorer la précision des comparaisons d'étalons de masse,

ET CHARGE le Bureau International des Poids et Mesures d'organiser ensuite une vérification des étalons nationaux de masse."

En vue de la vérification des étalons nationaux du kilogramme, dont il est question dans la Résolution ci-dessus, le BIPM a adressé en 1974 un questionnaire (voir p. A 24) à 18 laboratoires nationaux ou instituts et 4 constructeurs afin de connaître l'état actuel des méthodes et des techniques dans le domaine des masses et des pesées. Les quinze premières réponses reçues à ce questionnaire ont été dépouillées au BIPM. Le Président se reporte au résumé des conclusions préparé par Mr Girard

(Document RM/76-00) ; il en ressort clairement que, dans un certain nombre de domaines précis, les laboratoires nationaux considèrent comme nécessaire de poursuivre des recherches. C'est à partir des conclusions tirées des réponses au questionnaire que l'on a préparé l'ordre du jour de la présente réunion. En réponse à l'invitation à envoyer des représentants à cette première réunion sur les masses, de nombreux laboratoires nationaux ont préparé des documents se rapportant aux divers points de l'ordre du jour.

Le Président présente rapidement chacun de ces documents (*voir* la liste en annexe de ce rapport, p. A 23) et remarque l'importance que les laboratoires nationaux attachent aux problèmes liés à la correction de poussée de l'air, nécessaire lorsque l'on compare des étalons dont la masse volumique est différente ; en effet, plus de la moitié des documents traitant de questions techniques s'y rapportent. Le Président ajoute qu'à l'évidence les différents aspects de ce problème vont occuper une partie importante de cette réunion.

L'ordre du jour (*voir* p. A 21) ne faisant l'objet d'aucun commentaire ou addition, le Président passe au point 1.

I. ÉTALONS DE MASSE

I.1 *Conservation des étalons de masse*

Le Président demande à Mr Girard de donner des détails sur ses travaux concernant la conservation des étalons de masse. Mr Girard se réfère au document RM/76-5 dans lequel il présente les résultats de recherches faites au BIPM depuis trois ans sur les effets de la pollution atmosphérique sur la masse des Kilogrammes en platine iridié et en acier inoxydable. Il donne la description d'une nouvelle enceinte pour les Kilogrammes étalons ; celle-ci comporte un filtre destiné à empêcher l'entrée de fines particules de poussière qui arrivent à pénétrer dans les enceintes non étanches par suite des variations de la pression atmosphérique. D'après l'expérience qu'en a le BIPM, la masse des Kilogrammes conservés sur les supports habituels, sous la protection de deux cloches de verre rodées, augmente de 2 à 5 μg par année. Pour des Kilogrammes dont la surface présente de petites rayures, on a observé un accroissement allant jusqu'à 7 μg par année. Avec les étalons de travail du BIPM, qui sont soumis à un usage intensif, on a observé des accroissements de 3 ou 4 μg par année, tandis que

sur deux témoins du Prototype international on a observé un accroissement de 2,5 µg par année. Afin d'éprouver l'efficacité de l'enceinte avec filtre on a déposé deux Kilogrammes, l'un dans une telle enceinte et l'autre sur un support classique à double cloche, pendant sept mois dans un garage ouvert ; ils y étaient exposés à des conditions ambiantes beaucoup plus défavorables que celles que l'on rencontre normalement dans un laboratoire. La masse du Kilogramme conservé sous double cloche s'est accrue de 60 µg environ alors que celle de l'autre Kilogramme restait à peu près constante.

Mr Quinn demande quelles sont les dimensions des pores du filtre ; Mr Girard répond qu'ils ont environ un micromètre de diamètre. Suit une discussion sur les implications des expériences faites par Mr Girard. Mr Thomas dit qu'il faudra choisir avec soin le matériau pour fabriquer la nouvelle enceinte à cause du risque éventuel de contamination et qu'il faut poursuivre les recherches dans ce même sens. Mr Giacomo ne voit pas pour quelle raison on n'utiliserait pas une enceinte métallique. En réponse à une question du Président, il s'avère que dans la majorité des laboratoires on ne prend pas de précautions particulières pour filtrer l'air dans les pièces où sont conservés les Kilogrammes étalons. Mr Kochsiek pense qu'il est nécessaire de maintenir le taux d'humidité relative constant à mieux que $\pm 0,2$ près. Mr Thomas signale qu'il maintient par filtrage une atmosphère semi-stérile dans la salle des balances et dans la salle de stockage, où il règle habituellement à la fois l'humidité et la température.

Le Président indique la façon dont sont conservés au BIPM le Prototype international du Kilogramme et ses témoins ; il précise que l'humidité n'est pas maintenue constante et que de toute façon elle est différente de celle existant dans les laboratoires nationaux. Mr Girard signale que lorsque l'on retire des Kilogrammes en platine iridié du Caveau, il semble que leur masse se modifie pendant environ une semaine, ce qui laisse à penser que la constante de temps pour les modifications de masse dues à des variations de l'humidité ambiante est de l'ordre de la journée. D'après Mr Bower cette estimation est en accord avec la valeur qu'il a déduite d'observations faites sur des variations de masse dans des conditions analogues. Toutefois, l'opinion générale est que l'on ne dispose pas de renseignements suffisants sur ce point.

*I.2 Procédés de nettoyage et leur influence sur la masse des
Kilogrammes en platine iridié et en acier inoxydable*

Le Président introduit le problème du nettoyage des Kilogrammes en platine iridié et en acier inoxydable, en décrivant les procédés de nettoyage et de lavage utilisés au BIPM. Dans le premier cas on frotte doucement le Kilogramme avec une peau de chamois imprégnée de benzène pur ; ensuite on procède de la même façon avec une peau de chamois imprégnée d'alcool pur. Le lavage consiste à projeter sur la surface du Kilogramme un jet de vapeur d'eau déjà bidistillée, pendant que l'on fait tourner lentement l'étalon sur une plate-forme. Il signale que les observations concernant les effets du lavage ne concordent pas. Quelques laboratoires (NBS et NPL) font état d'une variation de la masse que l'on peut observer pendant les quelques jours qui suivent le lavage, alors qu'au BIPM on n'a rien observé de tel.

Pour Mr Thomas, le désaccord peut n'être qu'apparent et peut résulter simplement de la variation de la température du Kilogramme au fur et à mesure que celui-ci se refroidit après avoir été porté à 100 °C par la vapeur. Il dit que la constante de temps pour le refroidissement d'un Kilogramme placé à l'air sur une table est d'environ une heure. Cela implique que pour une différence initiale de température de 80 °C il faut 13 heures pour qu'un Kilogramme en acier inoxydable revienne à la température ambiante à 0,1 K près. Mr Thomas suggère qu'il est peut-être nécessaire d'attendre bien plus longtemps qu'on ne le pense après un lavage avant de pouvoir procéder à des comparaisons très précises. Mr Girard indique qu'au BIPM on met les Kilogrammes dans un dessiccateur (avec du gel de silice) pendant les deux jours qui suivent le lavage avant de commencer les pesées.

Mr Bower demande quelles sont les précautions prises pour éliminer la graisse de l'eau que l'on utilise pour le lavage. Mr Girard répond qu'à son avis il ne peut y avoir que très peu de graisse dans l'eau distillée trois fois.

Mr Kochsiek indique que le prototype du kilogramme de la PTB n'est jamais nettoyé, en revanche les Kilogrammes en acier inoxydable et en laiton sont nettoyés à l'alcool ainsi qu'aux ultrasons dans un bain d'alcool. Les effets de ces deux méthodes de nettoyage sont différents.

Le Président remarque qu'au BIPM on ne lave pas les Kilogrammes en acier inoxydable car on a observé des effets nuisibles. On les nettoie successivement à l'aide de peaux de chamois imprégnées de benzène et d'alcool. Mr Thomas indique que

dans son laboratoire on a étudié la chimie des surfaces afin de déterminer les méthodes de nettoyage les plus appropriées. Avec les Kilogrammes en acier inoxydable on peut obtenir une surface presque parfaitement propre au moyen d'un effluage dans une atmosphère d'hydrogène. Toutefois, une surface ainsi nettoyée est susceptible d'être ultérieurement contaminée par le soufre. A une question de Mr Giacomo, Mr Thomas répond que, jusqu'à maintenant, il n'est pas parvenu à des conclusions définitives mais qu'il en vient à penser qu'il ne sera pas possible d'obtenir une surface en acier inoxydable aussi stable qu'une surface en platine iridié : l'acier inoxydable reste plus sensible que le platine iridié à la contamination par l'oxygène. Mr Bower indique qu'au NBS on a effectué des expériences dans le vide sur des masses en platine lavées deux fois aux ultrasons dans un bain d'eau. La dispersion des déterminations ultérieures de la masse était cinq fois supérieure à celle obtenue avec des masses en acier inoxydable ordinaire soumises au même traitement. Certains participants se montrent sceptiques sur l'utilité des méthodes de nettoyage par ultrasons.

Le Président demande si des laboratoires ont fait des recherches sur la stabilité à long terme et les effets des conditions de conservation dans le cas des Kilogrammes en acier inoxydable, car le BIPM possède peu de renseignements à cet égard pour l'acier inoxydable ; il rappelle aux participants que pour les Kilogrammes en platine iridié l'accroissement de masse de 2 à 5 μg par année est bien établi et que cet accroissement peut être éliminé par nettoyage et lavage. Mr Girard ajoute que l'on a observé un accroissement de masse de 90 μg en quinze ans sur un Kilogramme en platine iridié dont la surface était médiocre. Il semble que des lavages répétés des Kilogrammes dont la surface est bonne n'entraînent que très peu de variations de leur masse. Mr Sakuma indique qu'il a conservé pendant trois ans une masse en or dans de l'azote et il pense que cette masse n'a pas varié, à $\pm 1 \times 10^{-8}$ près. Le Président précise que cette expérience a été faite dans un but différent ; la conservation à long terme d'étalons de masse dans un milieu autre que l'air conduira nécessairement à de sérieux problèmes lorsque l'on procédera ensuite à des comparaisons de masses avec des étalons qui sont toujours utilisés dans l'air.

I.3 Effets des conditions ambiantes (humidité, pression, etc.)
sur la masse d'étalons en platine iridié et en acier inoxydable

Le Président introduit le problème des effets de l'humidité sur la stabilité des étalons de masse. Il se réfère au document RM/76-4 qui présente les résultats préliminaires d'une étude effectuée au BIPM ; il s'agit des effets des variations de l'humidité de l'atmosphère ambiante sur la masse de Kilogrammes en platine iridié et en acier inoxydable. Mr Girard présente les résultats que l'on a obtenus jusqu'à maintenant ; il décrit comment on a comparé deux Kilogrammes en platine iridié et deux Kilogrammes en acier inoxydable à l'aide de la balance NBS-2 qui fonctionne maintenant régulièrement au BIPM. Au début l'humidité relative était de 0,65 environ ; elle a été réduite ensuite à 0,43. En prenant comme référence la masse de l'un des Kilogrammes en platine iridié, on n'a observé aucune variation de la masse de l'autre Kilogramme en platine iridié, mais la masse des deux Kilogrammes en acier inoxydable a diminué rapidement de 30 μg lorsque l'humidité a été réduite. Pendant les huit jours suivants, on a maintenu l'humidité à un taux de 0,43 et la masse des Kilogrammes en acier inoxydable s'est accrue lentement de 40 μg . On a ensuite ramené l'humidité à sa valeur initiale ; après quatre jours environ les Kilogrammes en acier inoxydable avaient perdu environ 10 μg , ce qui ramenait leur masse à sa valeur primitive à quelques microgrammes près.

Mr Kochsiek dit que l'on a effectué à la PTB des expériences analogues et que les résultats obtenus sont très semblables à ceux que vient de donner Mr Girard ; ces résultats seront publiés dans le courant de 1977. Ces recherches ont été effectuées en utilisant une balance modifiée, installée au-dessus d'une enceinte climatisée spéciale. Il semble que l'influence de l'humidité sur la masse des objets en platine iridié soit très faible. Une modification du taux d'humidité se traduit par un dépôt sur la surface du platine iridié qui disparaît après quelques jours. La présence d'une pellicule d'oxyde semble avoir une grosse influence sur les effets de l'humidité. Mr Kochsiek ajoute qu'à son avis c'est là un très important sujet de recherche et qu'il faut poursuivre les travaux sur ce point.

Dans la suite de la discussion sur la stabilité des masses, Mr Kochsiek demande avec quelle périodicité on nettoie les masses dans les autres laboratoires et si la fréquence des nettoyages dépend du nombre de pesées ou simplement de la durée

écoulée depuis le dernier nettoyage. Mr Pontius dit qu'au NBS il est d'usage de nettoyer le Kilogramme en platine iridié avant de s'en servir, mais de ne pas nettoyer les Kilogrammes en acier inoxydable. On n'y a observé aucune variation de la masse des Kilogrammes en acier inoxydable utilisés comme étalons de travail, à $\pm 40 \mu\text{g}$ près, limites dans lesquelles on a fait les observations. La différence entre les deux étalons de travail en acier inoxydable est demeurée inchangée pendant de nombreuses années.

Pour Mr Thomas, les variations de masse résultent de deux facteurs : l'élimination de poussières et l'enlèvement de particules de la matière de l'étalon lui-même, l'une et l'autre pouvant se produire au cours du nettoyage. Mr Pontius préfère penser que le nettoyage est une opération qui rend à la surface son état normal (pas nécessairement parfaitement propre) plutôt qu'une opération au cours de laquelle on enlève une certaine quantité de matière.

Le Président demande à Mr Girard de présenter ses résultats sur l'effet des variations de pression sur la masse des Kilogrammes étalons. Mr Girard reprend le document RM/76-4 ; là encore on a utilisé la balance NBS-2 pour comparer les masses de deux Kilogrammes en platine iridié et de deux Kilogrammes en acier inoxydable à des pressions de 100,7 kPa et 94,6 kPa. Après avoir abaissé la pression et tenu compte des variations de la correction de poussée de l'air entre les Kilogrammes en platine iridié et en acier inoxydable (variation d'environ 5,8 mg), il subsistait entre eux une différence d'environ 18 μg . Cette différence s'est réduite à environ 9 μg après cinq jours à la même pression de 94,6 kPa. On n'a observé qu'un très petit changement lorsqu'on a ramené la pression à 100,7 kPa et huit jours plus tard les Kilogrammes en acier inoxydable avaient repris leur masse initiale par rapport au Kilogramme en platine iridié utilisé comme référence. Mr Girard indique que les recherches se poursuivent.

Mr Pontius parle ensuite des travaux effectués au NBS : on y a comparé dans des conditions de pression et d'humidité extrêmement différentes des masses de un kilogramme en aluminium, en tantale et en acier inoxydable, de masse volumique respective $2,7 \text{ g/cm}^3$, $16,7 \text{ g/cm}^3$ et $8,5 \text{ g/cm}^3$. Il s'est avéré qu'en utilisant la formule classique pour le calcul de la masse volumique de l'air, il n'a pas été possible de faire concorder les comparaisons de masses faites au NBS à Washington et au NBS à

Boulder ; la différence d'altitude entre ces deux laboratoires est voisine de 2 000 m, ce qui correspond à une différence de pression atmosphérique d'environ 20 kPa. Il n'a pas été non plus possible de faire concorder des comparaisons de masses faites dans des enceintes dans lesquelles on peut faire varier la pression de 0,5 à 2 atmosphères. L'importance des désaccords est d'environ 1 mg pour des Kilogrammes dont le volume diffère de 200 cm³. Si toutefois, en même temps que l'on effectue les comparaisons de masse, on mesure la masse volumique de l'air au moyen d'objets de masse égale mais de volume extrêmement différent, et si l'on utilise la valeur mesurée de la masse volumique de l'air pour calculer la variation de la correction pour la poussée de l'air, à ce moment-là toutes les mesures dont il a été question plus haut concordent entre elles. Il en résulte que la formule classique de la masse volumique de l'air ne traduit pas de façon correcte les variations de la masse volumique que l'on observe dans la réalité. Mr Pontius indique que de nouvelles recherches sont en cours pour étudier les effets que l'on vient de décrire. En réponse à une question de Mr Quinn, Mr Pontius indique que les insuffisances de la formule classique pour le calcul de la masse volumique de l'air ne semblent pas dues seulement à des erreurs linéaires sur les valeurs numériques des données de départ. Mr Leister Haar, du NBS, a donné une formule de masse volumique de l'air qui tient compte du second coefficient du viriel de l'air ; celle-ci n'élimine toutefois pas le désaccord apparent. Mr Giacomo se réfère aux travaux de Mr Girard et demande quelles étaient les variations de la pression pendant les mesures qu'il a décrites précédemment (RM/76-4) lorsqu'on faisait varier l'humidité. Mr Girard précise : lorsqu'on faisait varier la pression, on ne réglait pas l'humidité mais la valeur mesurée de l'humidité relative ne variait que de 0,02 ; lorsqu'on faisait varier l'humidité, la pression était maintenue à une valeur constante.

I.4 *État de surface des masses étalons*

Le Président aborde la question de l'état de surface optimal pour les étalons de masse. Mr Kochsiek indique qu'on a commencé à la PTB un programme de travail tendant à voir le lien entre la stabilité de la masse et l'état de surface tel qu'il est observé au microscope. Mr Girard indique que les Kilogrammes en platine iridié sont polis mécaniquement à l'aide de pâtes au diamant. Mr Thomas précise qu'il est important de s'en servir correctement, c'est-à-dire d'utiliser un abrasif dur noyé dans

un liant plus tendre que le matériau que l'on polit. En effectuant le polissage de cette façon, on peut espérer que la surface finale est obtenue par enlèvement de matière de la surface et non par déformation plastique, laquelle risque d'entraîner l'inclusion de poches de gaz et de débris de polissage juste en-dessous de la surface finale.

Mr Kochsiek dit qu'il a l'intention d'étudier la stabilité des masses dont la surface a été soumise à un polissage électrolytique. Dans la suite de la discussion sur le traitement de la surface des étalons de masse, Mr Kochsiek dit qu'à la PTB on effectue le nettoyage final en se servant d'un bain à ultrasons, d'abord avec de l'eau, ensuite avec de l'alcool. Mr Thomas préfère que le nettoyage final soit fait à l'eau. Sa conclusion se fonde sur des considérations théoriques plutôt que pratiques, mais à son avis la théorie a des bases saines.

Mr Kochsiek ajoute qu'à la PTB l'expérience a montré qu'un étalon de masse présentant une bonne surface, bien polie, est bien moins sensible aux variations d'état hygrométrique qu'un étalon dont la surface est médiocre.

I.5 Influence des forces électrostatiques et magnétiques

Le Président aborde la question de l'influence des champs électrostatiques et magnétiques sur la comparaison des étalons de masse. Mr Thomas parle d'effets allant jusqu'à 5 μg qu'il a observés et qui résultent de champs électrostatiques. Aux faibles taux d'humidité, les arêtes des couteaux non métalliques sont de très bons isolateurs. Le problème peut être aggravé par l'effet des amortisseurs à brosses (dans l'ancienne balance de Collot) qui peuvent eux-mêmes constituer une source de fortes charges électrostatiques. Il souligne l'importance de mettre à la terre non seulement les diverses parties de la balance mais également l'intérieur de la cage, sinon on risque de produire des charges électrostatiques sur les grandes surfaces internes de la cage de la balance. Mr Thomas poursuit en disant qu'il n'est pas favorable à l'utilisation d'une source radioactive pour ioniser l'air dans le but de dissiper les charges électrostatiques, puisque même l'air ionisé n'est pas conducteur lorsqu'on a des tensions inférieures à 5 volts environ.

Le Président fait remarquer que, dans sa réponse au questionnaire, la PTB a attiré l'attention sur les grandes différences observées dans les qualités magnétiques des divers aciers inoxydables utilisés pour fabriquer des étalons de masse.

Mr Kochsiek dit qu'il a mesuré la perméabilité magnétique d'un grand nombre de ces aciers ; il a trouvé que certains d'entre eux ont une perméabilité 200 fois plus élevée que celle des meilleurs alliages utilisés pour faire des étalons de masse. Mr Quinn dit que des travaux sont en cours au NPL pour trouver un acier convenant à la fabrication des masses étalons, de masse volumique très voisine de 8 g/cm^3 . Il mentionne un certain alliage, le Nimonic 105, comme solution possible ; le problème semble être, pour le moment, de pouvoir s'en procurer facilement. Mr Riety indique que des recherches identiques sont en cours à l'INM ; elles sont centrées à l'heure actuelle sur un alliage qui contient du cobalt, du tungstène, du chrome, du nickel et 2 % de fer. Sa perméabilité magnétique relative est extrêmement proche de l'unité et il a une température de Curie inférieure à la température ambiante. La masse volumique de cet alliage est d'environ $9,2 \text{ g/cm}^3$. Mr Riety propose de fournir des échantillons de cet alliage aux autres laboratoires qui s'intéressent à ce domaine de recherche.

I.6 Matériaux autres que le platine iridié et l'acier inoxydable pour fabriquer des étalons de masse

Le Président demande quelles sont les possibilités d'utiliser le silicium comme étalon de masse ; il rappelle aux participants les travaux effectués au NBS sur les caractéristiques détaillées de cristaux de silicium presque parfaits. Mr Pontius indique que l'on a fait au NBS des recherches importantes sur l'emploi du silicium comme étalon de masse volumique. Le silicium semble très approprié à cette utilisation mais il le serait moins comme masse étalon à cause de sa fragilité et de sa tendance à s'écailler facilement. Mr Bower l'approuve ; il souligne la difficulté de travailler le silicium à cause de sa fragilité. Pour cette raison, les objets en silicium sont extrêmement délicats et ne conviendraient pas comme étalons de masse à cause du risque élevé de perte de matière.

Le Président parle des variations à long terme de la masse des étalons en acier inoxydable. On a observé au BIPM que la masse des Kilogrammes en acier inoxydable tend à décroître au cours des années, alors qu'au NRC on a observé aussi bien des augmentations que des diminutions de masse. Il ajoute que toutes ces observations ont été faites par rapport à des Kilogrammes en platine iridié, sur la stabilité desquels nous n'avons aucune espèce d'information à long terme au niveau du microgramme. En réponse à une question de Mr Riety, Mr Girard décrit les

méthodes habituelles que l'on utilise au BIPM pour le transport des Kilogrammes étalons.

II. COMPARETEURS D'ÉTALONS DE MASSE

II.1 *Méthodes habituelles et recherches sur les balances de grande précision pour la comparaison des masses dans le domaine de 1 kg à 1 mg*

Le Président aborde le second point principal de l'ordre du jour qui a trait aux balances et aux méthodes de pesée. Il signale les différents types de balance utilisés dans les laboratoires nationaux pour la comparaison des Kilogrammes aux niveaux les plus élevés de précision. A l'aide de quelques photographies, Mr Thomas donne une description de la nouvelle balance à couteaux qui est en cours de construction dans son laboratoire depuis quelques années. Il a l'intention d'utiliser cette balance tout d'abord pour étudier les effets de la poussée de l'air. La balance est du type à couteaux et à fléau symétrique, avec lecture automatique de la position du fléau. On utilisera des filtres interférentiels à bande étroite pour s'assurer que la quantité d'énergie transmise à la balance par le faisceau lumineux utilisé pour observer l'oscillation est négligeable. On prend beaucoup de soin pour éviter les gradients de température et les dérives de température dans la cage de la balance ; cette cage sera constituée de couches alternées de matériaux très conducteurs et de matériaux peu conducteurs. Le fléau de la balance est en bronze. La température dans la salle des balances dérive très lentement car tout le laboratoire est construit au-dessous du niveau du sol et la salle des balances elle-même se trouve à l'intérieur d'une enceinte à température contrôlée. Mr Thomas attire l'attention sur le problème des courants d'air dans la cage de la balance ; il indique que les courants d'air sont très difficiles à éliminer sauf si la cage est hermétiquement close. Une vitesse de déplacement de l'air de 1 mm par minute seulement peut faire apparaître un couple sur le fléau équivalant à 1 μ g. En décrivant la nouvelle balance, Mr Thomas rend hommage à Mr B.V. Jensen, qui travaille dans son laboratoire, pour l'habileté et le soin qu'il a apportés depuis un certain nombre d'années à la conception et à la construction de cette balance. Mr Pontius donne ensuite une description de la balance NBS-2 (qui a été offerte au BIPM et y fonctionne régulièrement), dont la mise au point a demandé dix à douze ans. Il souligne la nécessité d'être capable d'effectuer les comparaisons de masses rapidement pour éliminer les dérives lentes

qui rendent si longues les comparaisons de masses au plus haut niveau de précision. Mr Pontius fait remarquer qu'au NBS on a une préférence pour les balances à un seul plateau.

Mr Quinn donne ensuite une description des travaux en cours au NPL ; le but est de construire une nouvelle balance de grande précision, de portée 1 kilogramme, fonctionnant en atmosphère contrôlée ; on pourra faire varier la pression dans un domaine qui permettra d'étudier les effets de la poussée de l'air. Cette balance est du type à fléau symétrique ; elle a une suspension à ruban flexible. Le fléau, la suspension centrale et les suspensions terminales doivent être fabriqués à partir d'une même pièce massive d'alliage cuivre-beryllium afin d'éliminer tout joint et toute interface. En fonctionnement, le fléau sera asservi et on pourra effectuer les comparaisons de masses en utilisant les méthodes de pesée par substitution. Mr Quinn ajoute qu'un des facteurs limitatifs dans la conception qui est actuellement envisagée sera la stabilité de la base. Pour le moment on a l'intention de monter la balance directement sur un bloc de béton enterré dans le sol. D'après des mesures déjà faites, le bloc est stable en inclinaison à $\pm 0,05$ seconde d'arc près. Mr Thomas dit que l'inclinaison de la table sur laquelle sera posée sa balance est stabilisée à moins de $\pm 0,005$ seconde d'arc près.

Mr Riety parle des travaux en cours à l'INM sur la nouvelle balance primaire. On a pris une balance commerciale Mettler, dont on a modifié le fléau et sur laquelle on a installé un asservissement avec un capteur à détection magnétique. Les couteaux sont maintenus sous charge constante pendant la permutation des masses et les pesées. Mr Pontius décrit, à l'aide de diapositives, la nouvelle conception de la balance en cours de construction au NBS. Elle est du type à un seul plateau et fait appel à des articulations flexibles en feuillard de 25 μm enveloppant des cylindres qui roulent l'un contre l'autre. Le fléau de la balance a environ 20 cm de long et est asservi pendant les pesées. On a déjà atteint un stade avancé dans la construction de la balance et l'on pense qu'elle pourra fonctionner dans le courant de l'année 1977. Cette balance est conçue spécialement pour étudier les effets de la poussée de l'air. Mr Kochsiek donne une description de la balance actuellement en service à la PTB ; c'est une vieille balance Rueprecht à couteaux. A la PTB on entreprend l'étude préliminaire d'un fléau en "Zerodur", sur une balance à couteaux et à bras égaux, avant d'acheter ou de

construire une nouvelle balance. Les couteaux seront en saphir, les plans en saphir ou en carbure de bore.

Le Président signale que Oertling (Stanton) ne fabrique plus de balance de grande précision de portée un kilogramme et demande si l'on peut s'en procurer ailleurs. Mr Kochsiek répond qu'une société japonaise et une société américaine sont l'une et l'autre prêtes à faire des offres à des prix allant de \$ 65 000 à \$ 100 000.

Mr Sakuma parle du gravimètre enregistreur qu'il utilise au BIPM pour contrôler les variations de "g" sur de longues périodes. Il s'agit d'un instrument commercial modifié qui fait preuve d'une extrême stabilité lorsqu'il est maintenu dans une ambiance dont la température dérive seulement de 50 mK par an, et dont la stabilité de température à court terme est de l'ordre du microkelvin. Pour assurer ces conditions, le gravimètre est enfermé dans une boîte à 2 mètres au-dessous du niveau du sol. La sensibilité du gravimètre est comprise entre 1×10^{-10} et 1×10^{-11} de l'accélération due à la pesanteur. Mr Sakuma suggère qu'avec une telle sensibilité, en apportant une modification qui consisterait à suspendre une masse de un kilogramme à partir d'un point proche du centre de gravité du système, on pourrait peut-être étudier la constance à long terme de la masse du Kilogramme suspendu en observant les variations de l'élongation.

Le Président aborde les problèmes que pose la mesure précise de masses inférieures à 1 kg. Mr Rytz rend compte d'une comparaison d'étalons de masse de faible valeur effectuée en 1972. Le but de cette comparaison était de déterminer l'incertitude due aux pesées dans les mesures d'activité massique de radionucléides. En effet, au vu de la dispersion des résultats des mesures effectuées précédemment par plusieurs laboratoires nationaux dans le cadre de comparaisons internationales, il fallait s'assurer que l'exactitude dans les déterminations de masse était au moins égale à 1×10^{-3} . Six jeux de masses (comprenant chacun trois pièces respectivement de 20, 50 et 100 mg) furent d'abord étalonnés au Bureau Central des Mesures Nucléaires (BCMNM) à Geel, en Belgique, puis envoyés chacun dans un laboratoire spécialisé dans les mesures de radionucléides et finalement retournés au BCMNM après étude. Deux de ces jeux furent en outre étalonnés par les sections de métrologie des masses de la PTB et du BIPM. On arriva ainsi à la conclusion que les laboratoires de métrologie qui avaient pris part à cette

comparaison parvenaient à faire des mesures au microgramme près et que les laboratoires spécialisés dans les mesures de radio-nucléides pouvaient, dans les meilleures conditions, obtenir un écart-type d'environ 6 μg . On avait en conséquence considéré la situation comme tout à fait satisfaisante.

II.2 *Entretien et amélioration des balances pour les pesées de routine et les étalonnages de masse*

Le Président demande quelles sont les améliorations qu'il est souhaitable d'apporter aux balances courantes et à leurs systèmes de lecture. Mr Kochsiek dit qu'à la PTB on a mis au point un système interférométrique à laser dont la sensibilité est plus que suffisante pour des mesures de routine et dont l'étendue de mesure est de cinq degrés. Pour les travaux de recherche Mr Thomas préfère des autocollimateurs enregistreurs. Mr Quinn indique que dans le cas d'une balance asservie de très haute sensibilité, le système de détection doit obéir à des impératifs contradictoires. D'un côté il faut une très haute sensibilité, mais en même temps il est fondamental de couvrir un domaine important pour permettre au système d'asservissement de garder le contrôle du fléau pendant les oscillations dues à la substitution des masses.

Mr Pontius signale que l'un des objectifs des récents travaux du NBS sur les pesées de routine avait été de réduire le temps nécessaire à l'exécution complète des mesures. Il parvient maintenant à exécuter une pesée complète en 20 minutes seulement avec, en moyenne; un écart-type de 25 μg seulement. Mr Ulrich dit qu'il a monté un système interférométrique sur une balance Rueprecht pour étudier l'oscillation du fléau. La sensibilité du système est équivalente à 0,05 μg . On poursuit les travaux sur un nouveau fléau à adapter à cette balance. Le Président indique qu'au NRC on est en train de construire, sur la balance principale, un nouveau système à laser, à la fois pour suivre et pour asservir le fléau.

II.3 *Sources d'erreurs dans le fonctionnement des balances*

Le Président aborde le problème des mouvements de l'air et des gradients de température dans la cage de la balance. A son avis, un gradient vertical de température pourrait aider à assurer la stabilité de l'air. Il ajoute toutefois qu'au BIPM on n'introduit pas de gradient artificiel ; néanmoins, un gradient vertical existe dans la balance NBS-2 puisque la balance repose sur un pilier en béton qui est ancré directement dans le sol et

qui est plus froid que l'air de la salle ; il existe donc une différence de température entre le bas et le haut de la cage de l'ordre de 10 à 20 mK. Lors des pesées la température s'élève de 7 à 10 mK à cause principalement des frottements mécaniques. D'après Mr Thomas, il est préférable d'attendre que l'équilibre thermique soit atteint plutôt que d'introduire des gradients de température. Mr Pontius indique que l'une des conclusions tirées des travaux étendus effectués au NBS sur le comportement des balances, était que les gradients horizontaux de température étaient les plus gênants. On a trouvé qu'introduire délibérément un gradient vertical de température améliore énormément le comportement de la balance. En réponse à des questions posées par le Président et par Mr Quinn, Mr Pontius parle du comportement des balances asymétriques à plateau unique vis-à-vis des variations de la masse volumique et des mouvements de convection de l'air. Il indique que, grâce à une conception soignée, il est possible d'équilibrer les volumes, d'où les poussées, et que l'asymétrie résiduelle n'est plus qu'un petit facteur ennuyeux dont il faut tenir compte. Pour Mr Thomas les mouvements de l'air posent un problème beaucoup plus crucial que les variations de la poussée d'Archimède. Mr Pontius est du même avis ; il avait d'abord tenté de minimiser les effets de circulation de l'air mais il n'y est pas parvenu jusqu'au moment où il a introduit un petit gradient positif de température dans la cage de la balance. Mr Bower indique que pendant les recherches sur le volt absolu au NBS, il s'était également avéré nécessaire d'établir un gradient de température dans la cage de la balance. Mr Quinn fait remarquer que, pendant les travaux effectués au NPL sur la balance de courant, il se dégage des enroulements, au cours des mesures, une quantité de chaleur considérable et que cela doit nécessairement entraîner un gradient de température dans la cage.

II.4 *Entretien des balances*

Le Président aborde la question de l'entretien des balances de grande précision. D'après son expérience, au bout de dix ans d'utilisation, l'écart-type d'une balance est multiplié par dix par rapport à sa valeur d'origine, par suite de l'usure des couteaux. C'est là un problème, en particulier de nos jours, car l'affûtage et la remise en place des couteaux exigent une grande habileté et peu de gens sont capables de s'en charger. Mr Thomas est du même avis ; pour lui, cet art doit être conservé dans les laboratoires qui doivent utiliser des balances de grande

précision. Les fabricants eux-mêmes sont de moins en moins prêts et de moins en moins aptes à effectuer ce genre de travail. Il s'ensuit une discussion générale sur le problème, commun à tous les laboratoires de métrologie, d'avoir les mécaniciens et les techniciens hautement qualifiés dont ils ont besoin dans certains domaines de la métrologie. La difficulté de fournir aux mécaniciens et aux techniciens des motifs convenables pour les encourager à acquérir la compétence nécessaire semble à l'heure actuelle insurmontable. Il semble que, en conséquence, il faille remplacer une certaine dextérité manuelle par le travail de machines complexes qui souvent ne sont pas aussi efficaces, mais dont la mise au point demande presque toujours beaucoup de temps et d'argent.

III. CORRECTIONS

III.1 *Correction de poussée de l'air*

Le Président aborde la question de la correction qu'il faut apporter, pour tenir compte de la poussée de l'air, lorsque l'on compare dans l'air des étalons de masse volumique différente. Le problème fondamental est que, lorsque l'on compare un Kilogramme en platine iridié et un Kilogramme en acier inoxydable dans les conditions atmosphériques normales, les corrections pour la poussée de l'air s'élèvent respectivement à environ 55 mg et 155 mg. Il reste donc une correction différentielle d'environ 100 mg et pour avoir dans la comparaison des masses une erreur inférieure à 10 μg , il faut connaître cette correction à mieux que 1×10^{-4} près. Mr Riety cite la réponse de l'INM au questionnaire dans laquelle on discute des facteurs qui entrent dans la formule donnant la masse volumique de l'air. Dans ce document et son complément RM/76-12, les principaux facteurs d'incertitude mentionnés sont les suivants : a) les erreurs dans la composition de l'air entraînent une incertitude de $0,3 \times 10^{-4}$, tandis que les erreurs sur les masses molaires des composants et sur leur composition isotopique ont un effet négligeable ; b) l'erreur sur la valeur admise pour l'écart entre le comportement de l'air saturé de vapeur d'eau et celui d'un gaz parfait entraîne une incertitude de 1×10^{-4} . L'incertitude totale, en tenant compte des incertitudes ci-dessus et d'autres petits effets, s'élève à $1,7 \times 10^{-4}$. Toutefois, Mr Riety poursuit en disant qu'une étude des réponses au questionnaire a montré qu'il existe entre les différents laboratoires nationaux des différences dans la forme des équations utilisées ainsi qu'un

désaccord sur les valeurs numériques d'un certain nombre de données de base. En utilisant des exemples de ces formules et de ces données de base différentes pour calculer la valeur de la masse volumique de l'air à 101 325 Pa, 20 °C et un taux d'humidité de 0,5, Mr Riety démontre dans le document RM/76-8 que, bien que la plupart des résultats soient dispersés sur 1×10^{-4} , la différence entre les deux résultats extrêmes est voisine de 4×10^{-4} . Compte tenu de ces divergences, Mr Riety propose que, comme première étape vers une solution des problèmes dus à la correction de poussée de l'air, on adopte une formule commune avec des valeurs convenues pour les données de base. Mr Carré parle du document RM/76-14 dans lequel il a fait une analyse des réponses au questionnaire qui concernent précisément la correction de poussée de l'air. Il a rassemblé les diverses valeurs des principales constantes utilisées par les différents laboratoires et souligne les très grandes différences qui existent, tant entre les valeurs qu'entre les nombres de chiffres significatifs donnés par les laboratoires. Mr Riety indique qu'il est possible de calculer la masse volumique de l'air à 20 °C de deux façons, en partant soit de la composition de l'air soit d'une valeur conventionnelle pour la masse volumique de l'air sec à 0 °C. Les méthodes devraient être équivalentes. Le Président propose alors la création d'un Groupe de travail chargé d'étudier la question de savoir si l'on peut ou non trouver une formule commune pour la correction de poussée de l'air, formule qui pourrait ensuite être utilisée par tous les laboratoires. Cette proposition est acceptée et le Groupe de travail comprend les membres suivants : Mr Riety (INM), Mr F.E. Jones (NBS) et P. Carré (BIPM).

Le Président demande ensuite avec quelle précision il est possible de procéder à des mesures du taux d'humidité relative. Se rapportant au document RM/76-10, Mr Pontius dit que Mr Jones, du NBS, pense que l'on peut obtenir une exactitude de $\pm 0,005$. Alors qu'au BIPM on pense qu'il est possible d'avoir une exactitude d'au moins 0,01, confirmée par des comparaisons avec la PTB, Mr Girard dit qu'au NBS Mr Wexler fait des mesures avec une incertitude de $\pm 0,001$. Mr Bower considère que $\pm 0,01$ est le mieux que l'on puisse espérer dans la pratique. Mr Giacomo suggère d'utiliser des techniques d'absorption dans l'infra-rouge pour contrôler l'humidité et la concentration en CO_2 dans l'air qui entoure la balance.

Le Président sollicite ensuite des avis sur les diverses méthodes directes pour déterminer la masse volumique de l'air en

comparant des masses égales de volume différent. Mr Bower décrit les travaux qui se sont révélés nécessaires pour mesurer la masse dans le vide de composés organiques, dont la masse volumique était voisine de 1 g/cm^3 , dans le cadre d'une nouvelle détermination du "faraday". Il est nécessaire d'effectuer des mesures de la masse volumique de l'air pour les corrections de pesée de la 4-amino pyridine. Il donne la description d'une nouvelle méthode de pesée dans le vide : des échantillons pleins et creux en acier inoxydable, ayant des masses volumiques effectives de 8 g/cm^3 et $0,5 \text{ g/cm}^3$ respectivement, ont été placés dans un boîtier en acier inoxydable dans lequel on pouvait faire le vide et que l'on pouvait peser ensuite avec ou sans les échantillons à l'intérieur. La masse totale du boîtier avec les échantillons n'excédait pas 100 g. En pesant le boîtier (toujours vide d'air) contenant successivement l'échantillon creux, l'échantillon plein et un échantillon en platine, il a pu mesurer les différences de masse dans le vide de ces trois objets. On a trouvé que l'on pouvait obtenir un très bon accord entre les mesures qui mettaient en jeu les échantillons en acier inoxydable, mais on a observé une dispersion beaucoup plus grande dans le cas des échantillons en platine. Mr Bower suggère que cela pouvait être dû à une activité superficielle du platine beaucoup plus grande que celle de l'acier inoxydable. La différence de volume entre les échantillons pleins et creux en acier inoxydable était de 27 cm^3 et l'écart-type des mesures de masse était de $17 \text{ } \mu\text{g}$, ce qui conduit à une incertitude sur la masse volumique de l'air de 5×10^{-4} . Mr Thomas dit que l'on va utiliser dans son laboratoire une balance à enregistrement continu avec des masses en or et en acier inoxydable pour étudier les variations de la poussée de l'air. Le Président pense que la meilleure façon de s'attaquer au problème de la poussée de l'air serait peut-être de se mettre d'accord sur une méthode de mesure directe de la poussée de l'air pour un usage de routine. Il propose en conséquence de créer un second Groupe de travail pour rassembler des renseignements sur les méthodes de mesure de la poussée de l'air et pour faire un compte rendu de l'état de la question. Cette proposition est acceptée et le Groupe de travail 2 est ainsi constitué : Mr Thomas (Danemark), Mr Bower (NBS).

Le Président poursuit en proposant un troisième Groupe de travail chargé des effets de l'humidité, du nettoyage et des conditions de conservation sur la stabilité à long terme des étalons de masse. Ceci est accepté et le Groupe de travail 3 est

ainsi constitué : Mr Kochsiek (PTB) et Mr Girard (BIPM).

En outre, le Président se propose d'écrire à l'Institut de Métrologie D.I. Mendéléev (URSS) pour lui demander de désigner un participant au Groupe de travail 3 et de même au National Research Laboratory of Metrology (Japon) pour le Groupe de travail 2*.

III.2 Détermination de la masse volumique d'objets solides et de l'eau

Le Président passe au dernier point de cette section de l'ordre du jour et mentionne les articles de Green (NRC) et Bowman (NBS) sur les masses volumiques de référence, parus récemment dans *Metrologia*. La détermination de la masse volumique de l'eau et de sa variation en fonction de la température est une activité importante et, bien que ne concernant pas directement la présente réunion, elle a des répercussions à longue portée dans d'autres domaines. Des déterminations de la masse volumique de l'eau sont en cours dans un certain nombre de laboratoires et elle fait l'objet d'études entreprises au nom de l'UICPA. Le document RM/76-6 donne un état de la situation actuelle et de l'historique des travaux ; il comporte des copies de certaines des publications les plus récentes sur la question.

IV. CONCLUSION

En conclusion de la réunion, le Président demande aux participants quand, à leur avis, devrait avoir lieu la prochaine vérification périodique des Kilogrammes prototypes nationaux. Seuls la Grande-Bretagne et le Danemark** sont prêts à demander une vérification dans l'année 1977. Tous les autres participants sont satisfaits de l'état de leur prototype ou l'ont fait vérifier à une époque suffisamment récente pour qu'une nouvelle vérification soit inutile pour le moment. Mr Thomas demande si les participants seraient intéressés par un échange international de Kilogrammes en acier inoxydable. Le Président suggère que le BIPM organise une comparaison internationale d'un Kilogramme en platine iridié et d'un Kilogramme en acier inoxydable, tous deux circulant ensemble entre les laboratoires intéressés.

* L'IMM a désigné Mme N.A. Smirnova qui sera remplacée ultérieurement par Mr V.Y. Kouzmine.

** Mr Thomas a fait savoir ultérieurement qu'il préfère reporter cette vérification après la comparaison internationale qu'il a proposée.

Les participants sont d'accord pour que cette question soit laissée au soin du BIPM.

L'ordre du jour étant épuisé, le Président déclare close la réunion et remercie les participants.

(17 décembre 1976)

ORDRE DU JOUR

1. *Étalons de masse*

Conservation, mode de nettoyage et influence du nettoyage sur les étalons en platine iridié et en autres matériaux.

Influence des agents extérieurs (humidité, pression, vapeurs, gaz) sur la masse des étalons (platine iridié et autres).

Etat de surface ; réalisation et critères du poli (platine iridié et autres).

Influence des charges statiques et du magnétisme.

Recherche de matériaux pour la réalisation des masses (acier ou cristaux) ; qualités exigées.

2. *Comparateurs d'étalons de masse*

Types actuels de comparateurs pour masses de 1 kilogramme et au-dessous jusqu'à 1 milligramme ; précision absolue recherchée ; autres types de réalisation possibles.

Amélioration des performances des comparateurs actuels : système de lecture, rapidité des mesures, automatisation.

Causes d'erreurs dues aux balances : effet d'attraction entre balances et masses, magnétisme,...

Entretien des balances.

3. *Corrections*

Poussée de l'air :

a) formule utilisée ; masse du décimètre cube d'air sec ; mesure et exactitude des paramètres (température, pression, humidité, composition de l'air, ...) ; mesure dans des conditions ambiantes déterminées (valeurs fixées pour les différents paramètres ou masse volumique de l'air ambiant fixée).

b) mesure *in situ* de la masse volumique de l'air.

Détermination du volume des étalons de masse.

Masse volumique de référence (eau, solide).

4. *Questions diverses*

LISTE DES DOCUMENTS PRÉSENTÉS À LA
RÉUNION SUR LES MASSES

Document
RM/

- 76-00 Enquête sur les masses (15 mai 1975).
- 76-0 Projet d'ordre du jour.
- 76-1 Some Comments on Mass Measurements. Seminar by P. Giacomo (Séminaire à l'Ecole d'été Enrico Fermi, Varenna, Italie, 12-24 juillet 1976).
- 76-2 Note sur le calcul de la correction de poussée de l'air, par G. Girard (novembre 1976).
- 76-3 Lettre de Y.V. Tarbéev, directeur de l'IMM (11 octobre 1976).
- 76-4 Influence de la pression et de l'état hygrométrique sur les étalons de masse (Extrait du Rapport du Directeur sur l'activité et la gestion du BIPM, octobre 1974-septembre 1976).
- 76-5 Nouveau mode de conservation des étalons de masse, par G. Girard (novembre 1976).
- 76-6 Documents concernant la masse volumique de l'eau (sept tirés à part) :
1. Variation de la masse volumique de l'eau en fonction de sa composition isotopique, par G. Girard et M. Menaché, *Metrologia*, 7, 1971, p. 83.
 2. Nouvelles mesures de la masse volumique de l'eau en fonction de sa composition isotopique (Communication présentée par G. Girard et M. Menaché à la XVI^e Assemblée Générale de l'UGGI, Grenoble, 1975).
- Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée :*
3. Recommendation for the Redetermination of the Absolute Density of Water (Commission I.4 de la Physical Chemistry Division, septembre 1974).
 4. Sur la masse volumique de l'eau (Communication présentée par G. Girard à la Commission I.4 de la Physical Chemistry Division, septembre 1975).
 5. Recommended Reference Materials for Realization of Physico-chemical Properties, *Pure & Appl. Chem.*, 1976, 45, p. 1.
 6. Du problème de la masse volumique de l'eau. Conf. Int. de la vapeur d'eau, Giens (France), 1974.
 7. Sur les différentes tables de dilatation thermique de l'eau entre 0 et 40 °C, par M. Menaché et G. Girard (Publication BIPM et Institut Océanographique, Paris, septembre 1972 ; voir aussi *Metrologia*, 9, 1973, p. 62).
- 76-7 Commentaires de l'ASMW.
- 76-8 Remarques de l'INM.
- 76-9 Designs for the calibration of small groups of standards in the presence of drift (NBS Technical Note 844).
- 76-10 The air density equation and the transfer of the mass unit, by F.E. Jones.
- 76-11 Notes on the fundamentals of measurement and measurement as a production process, by P.E. Pontius (NBSIR 74-545 du NBS, 1974).

Document
RM/

- 76-12 INM.- Additif à la Note sur la masse volumique de l'air.
- 76-13 A knife-edges-balance for the comparison between prototype of Kilogram and primary standard weights, by Y. Kobayashi and K. Uchikawa (Bull. NRLM, 32, 1976, p. 6).
- 76-14 BIPM.- Masse volumique de l'air, par P. Carré (novembre 1976).
-

Questionnaire du B.I.P.M.
concernant les étalons de masse

1. Balance - Quelle est votre meilleure balance pour la comparaison des étalons de masse de 1 kg ? Dans quelle publication est-elle décrite ? A-t-elle été améliorée depuis cette publication ? Quel est l'écart-type d'une pesée ?
2. Etalons Pt-Ir - Dans quelle ambiance vos étalons de 1 kg en platine iridié sont-ils conservés (température, humidité, poussières, vapeurs de l'atmosphère) ? Nettoyez-vous ces étalons, comment ? Ce nettoyage change-t-il la masse ? Contrôlez-vous l'atmosphère où se trouve la balance pendant les comparaisons d'étalons ? Les variations de la composition de l'air, par exemple en vapeur d'eau, changent-elles la masse d'un solide en platine iridié par suite d'adsorptions superficielles ? L'état de poli de la surface du solide a-t-il une influence sur ces adsorptions ?
3. Etalons en acier inoxydable - La masse de vos étalons de 1 kg en acier inoxydable reste-t-elle constante dans le temps ? Quelle est leur composition chimique ? leur état de surface ? Mêmes questions que ci-dessus (conservation, nettoyage, adsorption superficielle).
4. Correction de poussée de l'air - Par quelles mesures expérimentales, et par quelle formule, calculez-vous la correction de poussée de l'air dans la comparaison d'étalons n'ayant pas la même masse volumique (par exemple, platine iridié et acier inoxydable) ?
5. Etudes désirables - Quelles sont, à votre avis, les études expérimentales qu'il conviendrait d'entreprendre pour améliorer la précision des étalons de masse et de leur comparaison ? Lesquelles de ces études pourriez-vous entreprendre dans les deux ou trois années à venir ?

30 octobre 1974.

Hommage à Jean TERRIEN

Séance spéciale du Comité International des Poids et Mesures
tenue au Bureau International le 21 septembre 1977

Le mercredi 21 septembre 1977, à 15 h, le Comité International a tenu une séance spéciale en hommage à Jean TERRIEN qui doit prendre sa retraite de directeur du Bureau International des Poids et Mesures à la fin de 1977.

Au cours de cette séance, à laquelle assistaient aussi une cinquantaine de personnalités invitées et le personnel du BIPM, plusieurs exposés scientifiques ont été présentés.

A l'ouverture de la séance, Mr J. V. DUNWORTH, président du CIPM, exprime en quelques mots ses sentiments à Mr Terrien, scientifique averti, qui a guidé avec habileté, sagesse et dévouement toutes les affaires du Bureau International des Poids et Mesures auquel il a consacré l'essentiel de son existence.

Mr J. de BOER, secrétaire du CIPM, prononce ensuite une allocution sur *J. Terrien, le BIPM et le SI* (voir p. B 2).

Trois exposés scientifiques sont ensuite présentés :

— *La gravimétrie au BIPM*, par J. Coulomb, président de l'Académie des Sciences de l'Institut de France (voir p. B 5);

— *Spectroscopie à haute résolution et à haute sensibilité*, par P. Jacquinet, membre de l'Académie des Sciences, directeur du Laboratoire Aimé Cotton, Orsay, France (voir p. B 10);

— *State of research on the precise determination of silicon lattice plane spacing*, par D. Kind, membre du CIPM, président de la Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Rép. Féd. d'Allemagne (voir p. B 23).

Mr P. HONTI, vice-président du CIPM, remercie les conférenciers de leurs brillants exposés et renouvelle à Mr Terrien, à l'approche de sa retraite, les sentiments de sympathie et les vœux du CIPM.

J. Terrien, le BIPM et le SI

On m'a demandé de dire quelques mots d'introduction pour cette séance scientifique, organisée en l'honneur de Mr J. Terrien qui va nous quitter comme directeur à la fin de l'année.

Nous voulons honorer maintenant ses activités comme directeur du Bureau International des Poids et Mesures et je veux essayer de les situer dans l'ensemble des activités du Bureau International, du Comité International avec ses Comités Consultatifs et de la Conférence Générale des Poids et Mesures.

Le Système International d'Unités (SI) joue un rôle central dans les travaux du BIPM; l'établissement, le maintien et le développement du SI sont parmi les tâches les plus importantes de ce laboratoire et des organes internationaux de la Convention du Mètre: Conférence Générale, Comité International et ses Comités Consultatifs. Dans ce contexte aussi, il faut situer et apprécier les activités du directeur et de ses collaborateurs — les cadres scientifiques, techniques et administratifs du BIPM.

Il n'est pas nécessaire d'expliquer ici ce qu'est le SI. Toutefois, il me semble utile de rappeler deux aspects différents du concept de « Système International d'Unités ».

Du point de vue d'un système métrologique, on devrait vraiment définir un étalon de mesure pour chaque grandeur physique et établir les étalons primaires, c'est-à-dire un ensemble d'unités de base indépendantes du point de vue métrologique. Le développement continu de la science et de la technologie demande une précision de plus en plus élevée et ouvre sans cesse de nouveaux domaines de recherche à la métrologie. Cela entraîne constamment une révision du système d'étalons de base, suivant les développements de la précision métrologique dans les différents domaines de la physique.

L'aspect systématique demande de créer un système d'unités, avec un symbolisme correspondant, qui satisfasse les exigences de la mathématique et qui s'incorpore d'une façon cohérente — en tant que « système d'unités » — dans l'ensemble des équations algébriques entre grandeurs avec lequel on donne une description des phénomènes expérimentaux.

Ces deux aspects — l'aspect métrologique et l'aspect systématique — posent souvent des conditions différentes et même incompatibles en principe. On dépend alors de la sagesse de ceux qui préparent les décisions à prendre: le BIPM, les Comités Consultatifs et finalement le Comité International et la Conférence Générale.

Établi dans sa forme présente il y a dix années afin de satisfaire aux besoins de la science, de la technologie et de la société en général, le SI doit

naturellement suivre le plus possible le développement de la science et de la technologie, avec ses besoins croissants en matière de précision. Mais il ne faut pas oublier que tout changement provoque des perturbations, spécialement dans les relations sociales, économiques et commerciales. Suivre et prévoir tous ces aspects est une des tâches importantes du BIPM.

Comme directeur du Bureau depuis 1962 — et même depuis 1937, date de son entrée au BIPM — J. Terrien a accompagné le développement de la métrologie scientifique avec prudence et sagesse, tenant compte des aspects métrologiques et systématiques du SI. Parcourir brièvement quelques événements des quinze dernières années implique donc de mettre en lumière les domaines dans lesquels J. Terrien a presque toujours joué un rôle décisif.

Dans une publication importante, intitulée « Scientific metrology on the international plane and the BIPM », publiée en 1965 dans le premier numéro de *Metrologia*, J. Terrien a remarqué qu'après 1960 une nouvelle période semble commencer pour la métrologie de haute précision, période dans laquelle la physique atomique et l'électronique rejoignent la mécanique et l'optique pour permettre d'obtenir une meilleure définition des étalons de base.

Ainsi, en 1960, la 11^e Conférence Générale décide de définir l'unité de longueur à partir de la longueur d'onde de la radiation orangée du krypton 86. Il est bien connu que cette décision a été préparée et influencée par les recherches admirables de J. Terrien — à ce moment-là encore sous-directeur — et de ses collaborateurs. A cette époque, les travaux du BIPM ont vraiment poussé le monde scientifique à faire le choix nécessaire.

Sept années après, la définition astronomique de l'unité de temps est remplacée aussi par une définition atomique utilisant la fréquence correspondant à la transition entre deux niveaux hyperfins du césium 133. Quoique le BIPM n'ait joué qu'un rôle intermédiaire dans ce cas, J. Terrien s'est efforcé d'instaurer une collaboration étroite avec le Bureau International de l'Heure pour établir le Temps Atomique International, de concilier les exigences des physiciens et des astronomes organisés dans l'Union Astronomique Internationale et d'éviter qu'apparaisse un sentiment d'aliénation.

Dans un brillant exposé sur la Métrologie fondamentale, présenté à la 14^e Conférence Générale en 1971, J. Terrien avait souligné avec force la nécessité de déterminer la vitesse de la lumière avec une précision beaucoup plus élevée, comparable à celle des unités de base, non seulement afin de satisfaire les demandes des astronomes et des missions spatiales, mais aussi pour les métrologistes qui s'occupent d'attribuer une valeur exacte aux étalons électriques. Quatre années après seulement, grâce aux progrès remarquables des lasers à gaz asservis sur des raies d'absorption, la Conférence Générale a pu recommander une valeur pour la vitesse de la lumière dans le vide; l'incertitude de 4×10^{-9} attachée à cette valeur correspond à l'indétermination de la réalisation du mètre lui-même. La question qui se pose dans ce cas pour le SI est claire : faut-il supprimer le mètre comme unité de base du SI? Comme directeur du BIPM et chercheur scientifique versé dans ce domaine, J. Terrien a attiré l'attention sur la nécessité de bien faire la distinction entre les aspects systématiques et les aspects métrologiques du SI; il a souligné aussi notre responsabilité d'éviter des changements trop fréquents dans les aspects systématiques du SI.

Le temps dont je dispose est insuffisant pour passer en revue les événements qui se sont produits pendant ces quinze dernières années, même en me limitant aux événements les plus importants. Je dois passer sous silence les progrès dans les autres domaines : l'unification des valeurs attribuées aux étalons électriques et l'utilisation de l'effet Josephson; l'adoption du texte de l'Échelle Internationale Pratique de Température de 1968, puis de son édition amendée de 1975; le progrès énorme fait dans la détermination très précise de la valeur de g . La plus importante nouvelle activité du BIPM dans cette période est sans doute l'établissement de la Section des Rayonnements Ionisants; avec ce laboratoire et l'équipe dévouée à ces tâches scientifiques, le BIPM a acquis une réputation internationale dans ce nouveau domaine.

Une des tâches les plus importantes du BIPM est de maintenir les liaisons, non seulement avec les autres laboratoires métrologiques, mais aussi avec la science en général, avec un grand nombre de personnes, d'institutions et de gouvernements avec lesquels notre organisation veut collaborer dans le meilleur esprit. J. Terrien l'a bien compris et il s'est montré vraiment un ambassadeur du Bureau. Il a pris part à de nombreux congrès scientifiques internationaux, il est membre de plusieurs commissions internationales — ses travaux réguliers pour la Commission Internationale de l'Éclairage sont bien connus — et il a visité de nombreuses institutions à l'étranger. Ainsi, il a beaucoup contribué à faire connaître le BIPM et ses activités dans le monde entier.

Un grand nombre de publications scientifiques — récemment encore, en novembre 1976, son article « Standards of length and time » dans *Reports on Progress in Physics* — ont contribué à la compréhension du développement de la haute métrologie et de la position du BIPM. La brochure « Le Système International d'Unités », publiée par le BIPM, a beaucoup influencé les milieux scientifiques nationaux et internationaux qui s'occupent de la normalisation et des aspects légaux du SI. En effet, la normalisation internationale considère souvent l'opinion du BIPM comme décisive en ce qui concerne le SI — situation qui donne aussi une grande responsabilité à notre organisation.

Les articles de J. Terrien dans les périodiques les plus divers, et même quelques livres de poche, ont informé le public en général — scientifique ou non — sur les activités du BIPM, les secrets de la métrologie et les avantages d'un bon système d'unités.

La Conférence Générale de 1975 a montré que le Système International d'Unités et le Bureau International des Poids et Mesures ont obtenu une place importante dans le monde. J'ai essayé de souligner comment J. Terrien, directeur du Bureau, a contribué au développement du BIPM et ainsi à la propagation du SI dans le monde entier.

J. DE BOER

La gravimétrie au BIPM

Mesdames, Messieurs, Mon cher ami,

Lorsque Pierre Giacomo m'a demandé de prendre la parole au cours de la présente cérémonie pour évoquer les travaux gravimétriques poursuivis au Bureau International des Poids et Mesures sous la direction de Jean Terrien, j'ai été heureux et touché de cette marque de confiance, mais confus de cet honneur et, au fond, assez embarrassé : je ne suis nullement spécialiste des mesures gravimétriques. Et comment parler devant des métrologistes de problèmes à coup sûr géophysiques mais plus encore métrologiques, sans avoir l'air de faire la leçon à des savants, parfaitement qualifiés pour apprécier les difficultés vaincues ? J'ai fini par admettre que certains d'entre vous accueilleraient sans trop d'ennui un rappel de travaux débordant un peu de leur spécialité particulière, et que les personnalités extérieures présentes n'auraient peut-être qu'une connaissance faible de ces problèmes. Bref, je me suis « mis à l'eau ». Que ceux à qui je n'apprendrai rien me pardonnent d'avance.

La pesanteur est employée comme force agissante dans beaucoup d'expériences métrologiques, notamment dans le rattachement des unités électriques aux unités mécaniques ; elle entraîne des corrections importantes à des déterminations comme celle du point d'ébullition de l'eau. Le Comité International des Poids et Mesures s'est donc préoccupé très tôt de faire mesurer l'accélération due à la pesanteur : la première détermination absolue faite au Pavillon de Breteuil, par Defforges, remonte à 1888. Mais je parlerai seulement aujourd'hui de l'évolution récente des mesures gravimétriques absolues et des vastes perspectives que cette évolution a ouvertes. L'aventure a débuté il y a 30 ans, exactement le 11 février 1946, jour où une Note de Charles Volet fut présentée à l'Académie des Sciences par Albert Pérard, à qui Ch. Volet devait succéder cinq ans après comme directeur du Bureau International.

Ch. Volet affirmait que la précision des mesures pendulaires plafonnerait vers ± 2 millièmes alors que les longueurs et les temps pouvaient déjà être mesurés à quelques dix-millionièmes près. Il rappelait les tentatives d'Amédée Guillet pour ressusciter la méthode simpliste de la chute des corps, et il annonçait la mise en route d'une série d'expériences sur la chute d'une règle divisée, périodiquement illuminée par des éclairs déclenchés. Je passe sur les détails, par exemple sur l'effet du gradient vertical de la pesanteur. Les expériences, qui durèrent jusqu'en 1951, avaient seulement un caractère préliminaire ; mais, à la demande du Comité International,

elles furent reprises de façon beaucoup plus poussée par Åke Thulin, assistant du Bureau, qui en tira, soit dit en passant, une thèse de Doctorat ès-Sciences, soutenue en juin 1959. Parmi les nombreuses améliorations techniques apportées par Å. Thulin, signalons seulement l'introduction d'un sismographe, qui ne lui permettait cependant pas de préciser suffisamment la position instantanée du repère fixe auquel il rapportait celle de la règle au cours de la chute.

La valeur $9,809\ 28\ \text{m/s}^2$, à une unité près du dernier ordre, trouvée par Å. Thulin pour le « point A » du Pavillon de Breteuil, diffère de 12 ou $13 \times 10^{-5}\ \text{m/s}^2$, autrement dit 12 ou 13 mGal, de la valeur dans le système de Potsdam telle qu'elle résultait des liaisons existant à l'époque. (Je prie les membres du Comité International et mon ami Jean Terrien de m'excuser si j'utilise parfois le vieux milligal malgré tout mon respect pour le Système International d'Unités). Le résultat de Å. Thulin corroborait les meilleures déterminations pendulaires et rendait évidente la nécessité d'une correction au Système de Potsdam. Nous y reviendrons tout à l'heure.

Dès 1956, Ch. Volet avait proposé au Comité International des Poids et Mesures d'essayer une nouvelle méthode, inventée par lui en 1947, qui éliminait par symétrie les erreurs systématiques dues au freinage de l'air et aux courants de Foucault. Cette méthode consistait à lancer vers le haut le corps d'épreuve, et à observer en deux stations fixes ses passages ascendant et descendant; les deux passages en une même station se font à la même vitesse et peuvent être observés avec la même précision. Ch. Volet pensait lancer des billes, et de fait le lancement de lentilles sphériques devait permettre à A. H. Cook d'obtenir en 1967 la valeur absolue de la gravité à Teddington avec un écart-type de $13 \times 10^{-7}\ \text{m/s}^2$ (attribuable surtout à l'agitation du sol). Mais en 1960, lorsque le BIPM eut engagé Akihiko Sakuma comme assistant pour attaquer le travail, J. Terrien s'était penché sur le problème optique et il avait donné à l'ensemble du projet une figure toute différente.

L'idée de J. Terrien était de transformer la variation d'altitude entre le corps mobile et un miroir horizontal fixe en variation du chemin optique dans le bras vertical d'un interféromètre de Michelson indé réglable. Le miroir mobile devait être obtenu en faisant coïncider le centre de gravité du corps avec le sommet d'un trièdre de miroirs. Un faisceau lumineux venant du zénith serait ainsi renvoyé verticalement même si le corps lancé devait subir une très petite rotation. D'autre part, un étalon de Pérot-Fabry inséré dans le bras horizontal de l'interféromètre devait permettre des réflexions sur l'un ou l'autre de ses miroirs extrêmes. Ainsi, des éclairs de lumière blanche émis par une lampe au krypton produiraient des franges pour deux positions du trièdre dont la différence d'altitude correspondrait à la demi-longueur de l'étalon. Saisir l'apparition de la frange achromatique centrale pour déclencher ou arrêter le comptage du temps semblait être la principale difficulté.

Ces principes ont remarquablement résisté à vingt ans de mise à l'épreuve, mais naturellement les détails ont évolué. Des techniques nouvelles ont été inventées ou adaptées avec une extraordinaire habileté par A. Sakuma, constamment épaulé par J. Terrien qui était devenu en 1962 directeur du Bureau. En un temps où se poursuivaient ici les recherches qu'impliquait la nouvelle définition du mètre et celles qui devaient aboutir au changement

de définition de la seconde, tous les domaines ont bénéficié des progrès réalisés dans chaque voie. Après les premiers résultats obtenus en 1963, les mesures absolues de pesanteur par la méthode des deux stations ont crû sans cesse en nombre, en cohérence, et en précision absolue. Elles se font régulièrement depuis 1967, et depuis lors l'avance du Bureau International sur tous les laboratoires étudiant le même problème est devenue incontestable.

Sans suivre une à une les améliorations apportées au schéma initial, par exemple le remplacement de la lampe au krypton par une lampe au xénon, ou celui de l'étalon de Pérot-Fabry par un étalon à bouts en silice fondue, ou les contrôles de planéité des miroirs, je voudrais donner une idée de quelques caractéristiques de l'appareil actuel.

La longueur de l'étalon, 80 cm environ, est déterminée en la comparant à la longueur d'onde de la radiation d'un laser à l'aide du même interféromètre de Michelson dont on fixe le miroir mobile. Ce laser à hélium-néon est asservi à une raie d'absorption saturée de l'iode. On connaît la longueur d'onde correspondante avec toute la précision de définition du mètre, soit un petit nombre de milliardièmes, mais, bien mieux, elle est reproductible à 10^{-10} près.

La chute a lieu dans un caisson blindé contre les variations magnétiques, où le vide est de l'ordre du cent-millième de pascal. Le lancement du corps implique des précautions extrêmes; par exemple, la corde élastique utilisée développe des charges électriques mais elles sont éliminées par un écran. Les vibrations internes du corps s'amortissent sur un trajet de 18 cm avant la station basse. La dérive horizontale, qui pourrait donner lieu à un effet Eötvös, est inférieure à 0,1 mm/s. Le comptage du temps se fait avec une résolution de 50 ns, mais on interpole à 0,1 ns près sur un enregistrement photographique des franges.

Un point particulièrement important est que les déplacements du miroir fixe dus aux vibrations et à l'agitation microsismique industrielle ou naturelle sont en grande partie éliminés ou corrigés grâce aux signaux d'un sismomètre vertical à longue période et d'un accéléromètre.

Enfin, la variation de pesanteur due à l'action lunisolaire, autrement dit la marée terrestre, peut dépasser le dixième de milligal. Elle est généralement déduite d'une formule théorique, d'où une incertitude importante, que A. Sakuma a fortement réduite en installant, avec des précautions exceptionnelles contre les microséismes et les variations de température ou de pression, un gravimètre qui enregistre la marée au microgal près par une méthode de zéro. Ce gravimètre est étalonné grâce aux mesures faites à l'appareil absolu. Les marées de l'atmosphère sont négligeables à la précision recherchée, mais on peut espérer obtenir des résultats intéressants relatifs à l'effet d'attraction des grandes masses d'air.

Revenons aux mesures absolues de pesanteur. Leur incertitude est presque descendue à 10^{-9} et l'atteindra lorsque la définition du mètre sera précisée. Autrement dit, la valeur de g au Pavillon de Breteuil sera bientôt connue au microgal près. Un microgal correspond à une variation d'altitude de 3 mm. La hauteur du point auquel se rapportent les mesures doit être connue avec une approximation meilleure. Si le gradient de pesanteur est constant sur le parcours du corps lancé, ce point est situé sous le sommet de la trajectoire, au tiers de la distance entre ce sommet et le point moyen

des deux stations; et bien entendu la stabilité de l'ensemble est convenablement assurée.

La valeur trouvée à 10^{-7} près, il y a dix ans déjà, pour la station Sèvres A, soit 9,809 260 dans le Système International, différerait de 13,8 mGal de sa valeur dans le Système de Potsdam. Elle évolue lentement depuis 1966. Tout déplacement artificiel de masses voisines étant éliminé, ces variations qui sont de l'ordre de quelques centièmes de milligal correspondent peut-être à des changements de niveau de la nappe phréatique. Quoi qu'il en soit, le résultat précédent, joint à ceux des autres laboratoires, a précisé l'écart indiqué par Å. Thulin et a conduit l'Association Internationale de Géodésie, puis l'Union Géodésique et Géophysique Internationale, enfin en 1968 le Comité International des Poids et Mesures, à retrancher 14 mGal de toutes les valeurs du système de Potsdam.

Ce n'était là qu'un palliatif, et l'UGGI s'est aussitôt efforcée de mettre sur pied un Réseau gravimétrique international de stations d'étalonnage, désigné en anglais par les mots « International Gravity Standardization Net 1971 » ou plus brièvement IGSN 71. Ses stations sont liées entre elles, comme aux stations de mesures pendulaires relatives, grâce au transport rapide de gravimètres ordinaires, avec une compensation générale de ces liaisons. Les mesures gravimétriques régionales, en particulier celles qui accompagnent les nivellements de précision afin de définir les cotes géopotentielles, devraient désormais s'accrocher à deux ou mieux à trois stations IGSN 71.

Ces stations IGSN ne peuvent guère être utilisées pour des études de variations à longue période, car leurs liaisons de définition s'étendent sur des années. Le Bureau Gravimétrique International envisage pour 1983 l'établissement d'un nouveau réseau résultant de liaisons rapides et incorporant en outre des stations de mesures absolues. A partir de cette date les déterminations absolues pourraient être assez nombreuses (7 ou 8 pour la France par exemple) pour enlever pratiquement tout intérêt aux autres stations IGSN. C'est encore le Bureau International des Poids et Mesures qui jouera sans doute ici le rôle déterminant.

Tout d'abord, une nouvelle « station Sakuma », analogue à celle de Sèvres, est entrée en fonction cette année à l'Observatoire de Mizusawa (Japon), un de ceux qui participent au Service International des Latitudes et à la détermination du pôle terrestre, qui de plus est situé dans une région sismique où une évolution de la pesanteur peut avoir une valeur prémonitoire.

La multiplication éventuelle des stations absolues dépend cependant de la réalisation d'appareils transportables, tel que celui dont A. Sakuma avait défini le projet dès 1965. Sa réalisation a été poursuivie sous diverses formes : par l'Université Wesleyenne de Middletown avec une masse de 800 kg; par la Société Thomson-CSF à Paris en vue d'une commercialisation éventuelle, avec 130 kg; enfin par l'Istituto di Metrologia G. Colonnetti, de Turin. Dans ces appareils la station supérieure est le sommet de la trajectoire, la station inférieure correspond au début du comptage du temps. Leur différence de niveau s'obtient en comptant dans les deux sens les franges produites par un laser stabilisé; on évite ainsi l'usage d'un étalon de longueur. Le vide est seulement de quelques dixièmes de pascal. Les vibrations du sol sont compensées en remplaçant le miroir fixe par un trièdre

suspendu à l'extrémité du bras d'un sismographe sensible à la composante verticale. La précision est voisine du centième de milligal; l'appareil italien est actuellement utilisé pour une vérification à deux centièmes de milligal près de la base méridienne d'étalonnage qui s'étend d'Hammerfest (Norvège) au Cap (Afrique du Sud). Mais A. Sakuma a commencé en 1976 la fabrication d'un second prototype, quatre fois plus précis, qui pourra être commercialisé.

Un réseau international constitué à l'aide de ces appareils permettrait, s'il était périodiquement réoccupé, de savoir si les variations lentes de g observées à Sèvres sont essentiellement locales, ou si elles correspondent partiellement à une évolution régionale ou générale de la pesanteur; parmi les causes possibles, on peut penser à la sismicité et au volcanisme, aux variations du niveau des mers, au déplacement des plaques lithosphériques, éventuellement à une résonance de la Terre sur des marées à longue période, annuelle, chandlienne, etc. L'évolution de la constante de gravitation postulée par certaines théories relativistes serait encore bien plus lente.

Si on s'intéresse seulement à de vastes mouvements verticaux du sol et des océans, il faudra, comme l'a proposé J. J. Levallois dès 1970, choisir une vingtaine de stations localement très stables, régulièrement espacées, reliées à des groupes de marégraphes par des nivellements de très haute précision. La permanence de telles stations poserait des problèmes accablants: le tiers de celles de l'IGSN 71 a déjà disparu. Comme l'a constaté R. K. McConnell, celles qui avaient été placées dans des églises ont tenu bon. Faudra-t-il créer des sanctuaires de pesanteur? Notre génération, qui va mettre sur les épaules des suivantes la garde de ses déchets radioactifs, n'en serait pas effrayée. Mais laissons le futur et revenons au présent.

Dans tout mon compte rendu je n'ai pas cherché à établir la part des réflexions, des conseils ou des critiques de J. Terrien dans les réalisations de A. Sakuma. C'eût été difficile, et parfaitement vain. L'immense succès de la pièce gravimétrique jouée au Pavillon de Breteuil résulte de la conjugaison d'un metteur en scène et d'un acteur tous deux exceptionnels. L'Académie des Sciences les a honorés par des prix, le Bureau des Longitudes a nommé J. Terrien membre titulaire et A. Sakuma correspondant, tout ce que permettait sa nationalité. Je voudrais à mon tour leur dire à tous deux la reconnaissance et la profonde admiration des géophysiciens.

J. COULOMB

Spectroscopie à haute résolution et à haute sensibilité

Monsieur le Président, Mesdames, Messieurs,

La spectroscopie ne se sent pas étrangère ici, si l'on songe à la part considérable qu'elle tient dans l'œuvre de J. Terrien. C'est même à propos de spectroscopie que j'ai connu son nom pour la première fois, en 1933, quand j'ai lu une publication de J. Terrien sur l'effet Zeeman des raies de l'argon; il travaillait alors au Laboratoire Zeeman d'Amsterdam.

Vous voudrez bien m'excuser si je vais parler de spectroscopie dans un esprit qui n'est pas du tout métrologique; j'ai un grand scrupule à cela, mais P. Giacomo m'a assuré que je pouvais le faire; nous verrons s'il avait raison.

Le titre que j'ai donné, « Spectroscopie à haute résolution et à haute sensibilité », est trop général; le sujet serait trop vaste si je devais expliquer à la fois comment on peut obtenir une haute résolution et quelles en sont les limites, comment on peut obtenir une haute sensibilité et quelles en sont les limites. Aussi vais-je supposer connus les procédés qui permettent d'obtenir une très haute résolution, aussi bien en spectroscopie d'émission qu'en spectroscopie d'absorption. En particulier, je supposerai connues les méthodes qui permettent de s'affranchir de l'élargissement dû à l'effet Doppler, c'est-à-dire les méthodes qui permettent de faire intervenir dans le phénomène une seule classe de vitesses. Je vous rappelle seulement que l'on peut y parvenir soit en utilisant un jet atomique (ou moléculaire) éclairé transversalement, soit en utilisant un laser très monochromatique qui interagit seulement avec une classe de vitesses, laquelle classe de vitesses intervient ensuite seule dans le phénomène; un exemple d'utilisation de cette dernière méthode est bien connu sous le nom de spectroscopie d'absorption saturée.

Supposant connus les moyens pour arriver à une haute résolution, je m'attacherai seulement à parler de haute sensibilité, étant bien entendu que l'on veut aussi, en même temps, obtenir une haute résolution. Pour simplifier, je supposerai que les atomes avec lesquels on va travailler appartiennent à une seule classe de vitesses. C'est une hypothèse très réaliste; on la réalise effectivement lorsqu'on travaille avec un jet atomique.

Faut-il vraiment justifier la recherche d'une haute sensibilité? Certes, son intérêt métrologique est très faible, sinon nul, mais il y a de nombreux problèmes où l'on dispose d'une très faible quantité de matière, ou encore où l'on veut identifier des atomes qui existent en très petit nombre.

Je donnerai à la fin de mon exposé un exemple d'études spectroscopiques à haute résolution qui ont été faites sur des isotopes instables du sodium, de durée de vie très courte, produits en très faible quantité au moyen de réactions nucléaires. Je m'efforcerai donc de décrire quelques méthodes qui permettent d'observer des raies spectrales avec très peu d'atomes et j'essaierai d'évaluer théoriquement la sensibilité ultime que l'on peut atteindre.

Si j'avais voulu donner un titre sensationnel à mon exposé, je l'aurais intitulé « Combien faut-il d'atomes pour observer une raie spectrale? ». Quand j'étais au lycée, on m'a appris qu'on ne doit pas parler d'une chose sans l'avoir définie. Or, définir la sensibilité est très difficile, aussi renoncerais-je à en donner une bonne définition; je me contenterai de dire comment caractériser quantitativement ce qu'on peut appeler la sensibilité. Qualitativement, une méthode sensible est une méthode qui permet de travailler avec très peu d'atomes; si l'on veut aller plus loin, voici ce qu'on peut essayer de faire.

Comment peut-on non pas définir mais caractériser la sensibilité?

On peut d'abord penser au nombre d'atomes par unité de volume, c'est-à-dire à la densité numérique des atomes qui est nécessaire pour obtenir un point de la courbe spectrale, un point du spectre; appelons n cette densité. Nous supposons que l'on se donne le rapport signal/bruit que l'on veut obtenir dans la mesure et la durée T de la mesure pour un point du spectre. On trouve alors qu'on a besoin d'une densité minimale n . Si l'on veut étudier m points du spectre, la durée de la mesure est m fois plus grande et la densité minimale n est la même.

Il y a une autre façon d'aborder le problème, en cherchant quel est le nombre total d'atomes nécessaire pour obtenir un spectre; appelons-le N . Ce point de vue est spécialement intéressant pour les atomes instables: si un atome radioactif a une durée de vie plus courte que la durée de l'expérience, cet atome est perdu. Donc, ce qui va être intéressant, c'est la consommation totale d'atomes, N . On s'impose d'obtenir un certain rapport signal/bruit et cela conduit à utiliser une durée de mesure qui n'est plus une donnée du problème. Si l'on veut étudier un point du spectre, il faut un certain nombre d'atomes, N_1 ; mais comme ces atomes sont ensuite perdus, si l'on veut étudier m points du spectre il faut encore d'autres atomes; le nombre total d'atomes nécessaire est donc le produit du nombre de points du spectre multiplié par le nombre d'atomes pour un point du spectre: $N = mN_1$.

Certains auteurs aiment bien parler du flux d'atomes. Mais alors la définition devient trop vague, parce qu'il est difficile de savoir quelle est la donnée réelle du problème. Nous nous en tiendrons soit à la densité n , soit au nombre total N d'atomes consommés, étant entendu que ces atomes sont alors perdus.

Maintenant, essayons de réfléchir à ce qu'est en général une méthode de spectroscopie. Toute spectroscopie se ramène à l'étude des transitions entre deux niveaux d'un système. Ces transitions peuvent être des transitions d'absorption ou au contraire d'émission.

Si l'on opère en spectroscopie d'émission, comment fait-on? On peuple le niveau 2 et on étudie le rayonnement spontané correspondant aux transitions du niveau 2 vers le niveau 1, le niveau fondamental. Mais ce niveau 2,

comment fait-on pour le peupler? On emploie en général des procédés très barbares, par exemple la décharge électrique. L'efficacité de ces procédés est extrêmement faible, c'est-à-dire qu'une très petite proportion des atomes sont portés au niveau supérieur, si bien qu'il y a un gaspillage important d'atomes. De toute façon, lorsqu'on observe le rayonnement spontané $2 \rightarrow 1$, on est finalement limité par la statistique du nombre des photons émis. En réalité, si l'on veut obtenir des méthodes très sensibles, on opérera par comptage de photons et c'est la statistique de ce comptage qui limitera la sensibilité. Les meilleures performances permettent de travailler avec un nombre total d'atomes de l'ordre de 10^{12} , disons plutôt 10^{13} , dans le cas d'atomes stables ou à longue durée de vie. Cela fait à peu près un nanogramme de substance. C'est déjà un record très remarquable et il faut se donner beaucoup de mal pour atteindre ce résultat; certains auteurs l'ont fait. Pour la spectroscopie d'émission, nous devons donc nous attendre à ce qu'elle ne soit pas très sensible en raison du gaspillage considérable dans l'excitation des atomes.

L'autre méthode est appelée méthode d'absorption ou encore quelquefois méthode de résonance; les deux expressions sont équivalentes. Cette méthode est bien plus sensible. En quoi consiste-t-elle? Elle consiste à éclairer le système avec un rayonnement monochromatique de fréquence ν variable et à mesurer la fréquence ν_{1-2} qui permet de réaliser la transition de 1 vers 2. Donc, on éclaire le système atomique avec une source monochromatique accordable dont on fait varier la fréquence ν , et quand ν est égal à ν_{1-2} il se passe quelque chose. C'est ce quelque chose que l'on observe.

Les procédés d'observation peuvent se grouper en deux grandes classes.

On peut faire une observation optique. Elle peut consister tout simplement à envoyer un faisceau lumineux à travers une cuve et à voir comment ce faisceau est absorbé. Cette méthode d'observation n'est pas très sensible: s'il y a très peu d'atomes, la plupart des photons passent sans être absorbés et le facteur d'absorption est très petit; on est obligé de mesurer une très petite variation de l'intensité d'un faisceau et là encore la précision est limitée par le rapport signal/bruit. Des calculs quantitatifs montrent qu'on peut déjà obtenir une très bonne sensibilité.

On conçoit qu'on obtient une sensibilité bien meilleure si, au lieu d'observer les photons qui disparaissent du faisceau incident, on observe les photons qui apparaissent à côté du faisceau incident lors du retour à l'état fondamental, c'est-à-dire si l'on observe la fluorescence. Dans ces conditions, on a seulement à compter les photons fluorescents et on conçoit bien que cette méthode est plus sensible. Aussi parlerons-nous seulement de cette méthode de fluorescence.

On peut aussi détecter la résonance par des méthodes non optiques. Quand la résonance se produit, il se passe quelque chose, en particulier pour les atomes eux-mêmes. Si les atomes changent d'état ils peuvent changer de comportement, et leur comportement peut être observé par des méthodes non optiques.

Dans tous les cas, tout se ramène à un comptage. En détection optique, on compte des photons; en détection non optique, on compte des atomes; on sait en effet compter des atomes, et nous supposons que la limite ultime est donnée uniquement par la statistique de comptage, ce qui

correspond à la réalité. Nous devons aussi nous intéresser au rapport signal/bruit qui va être déterminant.

Tout dépend du nombre d'atomes ou plus exactement de la proportion des atomes qui sont portés au niveau 2. Le rapport $\varepsilon = N_{\text{excité}}/N_{\text{total}}$ est déterminant. Si ce rapport est élevé nous avons une sensibilité élevée et s'il est faible nous avons une sensibilité moins bonne.

Dans le processus de décharge électrique en émission, ce rapport est très faible. Il est de l'ordre d'un millionième. Dans les autres méthodes, ce rapport peut être beaucoup plus élevé. Notre premier travail va être d'évaluer ce rapport en étudiant, à partir de quelques considérations assez bien connues en général, le phénomène d'interaction entre un rayonnement monochromatique et un système à deux niveaux.

La figure 1 schématise un système à deux niveaux que l'on fait interagir avec une radiation monochromatique. Nous supposons qu'entre ces deux niveaux ne peuvent intervenir que les phénomènes suivants : 1° absorption des photons incidents, 2° émission stimulée et 3° émission spontanée.

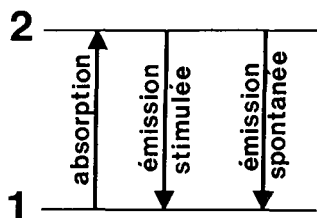


Fig. 1. — Système à deux niveaux en interaction avec une radiation monochromatique.

On montre facilement qu'à l'équilibre la fraction ε d'atomes excités est donnée par $\varepsilon = \xi/2(1 + \xi)$, avec $\xi = I/I_s$, où I est l'intensité du rayonnement monochromatique excitateur et I_s l'« intensité à saturation », elle-même définie comme étant l'intensité excitatrice qui permet d'obtenir la moitié de la saturation. En effet, si l'on porte ε en fonction de I , donc de ξ , on obtient une courbe avec une saturation (fig. 2). Si I devient très

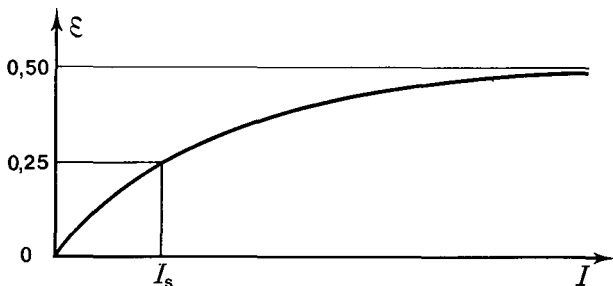


Fig. 2. — Variation du rapport ε du nombre des atomes excités au nombre total d'atomes en fonction de l'intensité I de la radiation excitatrice, pour des atomes à deux niveaux.

grand, ε est égal à $1/2$: la moitié des atomes sont excités, c'est-à-dire que la population se répartit également entre le niveau fondamental et le niveau excité; on dit qu'il y a saturation. Pour une certaine intensité I_s on est à la moitié de la saturation; cette intensité I_s est donnée, dans ce cas simple, par l'expression $I_s = 4\pi\sigma^2A$, où σ est le nombre d'ondes de la radiation incidente et A est la probabilité de transition de Einstein. Si l'on prend une radiation de longueur d'onde $\lambda = 1 \mu\text{m}$, $\sigma = 10^4 \text{ cm}^{-1}$ et une valeur moyenne pour A , soit $A = 10^8 \text{ s}^{-1}$, on obtient pour l'intensité qui permet d'obtenir la demi-saturation $I_s = 10^{17} \text{ photons}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, ou encore $0,2 \text{ mW}/\text{mm}^2$ (les faisceaux laser ont généralement une section de l'ordre de 1 mm^2). S'il y avait un élargissement Doppler, il faudrait apporter une correction. Il est très facile avec un faisceau laser d'obtenir $\xi = 1$ parce que cette puissance est relativement petite, même pour un laser très monochromatique, très stable. Autrement dit, avec un laser, on arrivera très facilement à avoir le quart des atomes dans l'état excité. Avec une source spectrale conventionnelle, en isolant la même bande de fréquence, ξ serait seulement de l'ordre de 10^{-6} . Cela explique le progrès considérable qui peut être fait si l'on utilise des lasers.

Examinons maintenant la détection par fluorescence. Les atomes sont dans une cuve ou dans un jet atomique. On éclaire avec un faisceau laser et il y a des photons émis dans toutes les directions. On en recueille autant qu'on peut sur un photodétecteur et on compte les photoélectrons. Le signal s est très facile à évaluer si on l'exprime à l'aide du nombre de photoélectrons comptés pour obtenir un point du spectre. Il est égal au nombre d'atomes excités N_e multiplié par la probabilité de transition par unité de temps A , multiplié par la durée T de la mesure pour un point du spectre, et par η , l'efficacité quantique du photodétecteur; il faut encore tenir compte d'un facteur r qui est simplement la fraction de l'espace dans laquelle on collecte les photons, car il y a un certain gaspillage des photons. Donc $s = N_e r A \eta T$. Cette expression peut encore s'écrire $s = N e r A \eta T$, où N est le nombre total d'atomes dans le volume d'interaction. Quant au bruit qui limite la mesure, s'il n'y a pas de lumière parasite, c'est simplement \sqrt{s} . On peut s'arranger pour qu'il n'y ait pas de lumière parasite, tout au moins pour qu'il y en ait très peu, par des filtrages adéquats.

Le rapport signal/bruit s'évalue facilement: si l'on veut qu'il soit supérieur à une certaine valeur K , le reste du calcul est évident. On trouve que le nombre minimal d'atomes dans le volume d'interaction, pour obtenir un rapport signal/bruit égal à K , est donné par l'expression

$$N_m = 2 \left(1 + \frac{1}{\xi} \right) K^2 / \eta T r A$$

dans laquelle le paramètre de saturation ξ intervient. Bien que N_m diminue si ξ augmente, il n'y a pas intérêt à prendre ξ très grand; de toute façon le terme entre parenthèses ne peut pas devenir plus petit que 1 et, si l'on prenait une lumière trop intense, il interviendrait d'autres phénomènes comme un élargissement des raies. Donc, si c'est possible, et c'est presque toujours possible avec un laser, on prendra $\xi \approx 1$, auquel cas la parenthèse vaut 2.

Le nombre minimal d'atomes nécessaire dans le volume d'interaction est alors donné par la relation $N_m = 4 K^2 / \eta T r A$. En y introduisant quelques

valeurs caractéristiques : une efficacité quantique $\eta = 0,1$, une durée d'intégration $T = 10$ s (ce qui est confortable), $r = 0,01$ (cela veut dire qu'on a un système optique assez ouvert, mais on perd quand même 99 % des atomes), $A = 10^8$ s⁻¹ (qui est un ordre de grandeur raisonnable) et un rapport signal/bruit tel que $K^2 = 2,5$ (pour que cela donne un nombre rond), on arrive à un nombre minimal d'atomes $N_m = 10^{-5}$, ce qui est tout à fait surprenant.

Quand on trouve ce résultat, on recommence le calcul au moins trois ou quatre fois et on le montre à des amis pour s'assurer qu'on ne s'est pas trompé. Il n'y a pas d'erreur, c'est bien 10^{-5} . Autrement dit, par cette méthode, il suffit de beaucoup moins d'un atome, en moyenne bien entendu, pour observer un point d'une raie spectrale. Voilà un résultat absolument surprenant, mais dont on peut assurer qu'il est exact.

Si maintenant on veut évaluer la densité d'atomes nécessaire et si l'on prend un volume d'interaction très réaliste, par exemple une longueur de 1 mm et une section de 1 mm², ce qui correspond à un laser et à un jet atomique, le volume est de 1 mm³ et la densité d'atomes minimale est alors $n_m = 10^{-2}$ cm⁻³. Il suffit de beaucoup moins d'un atome par centimètre cube pour observer un point d'une raie spectrale, avec une haute résolution, la plus haute qu'on puisse obtenir.

Bien entendu, cela est dû à l'excellente valeur de ξ . Si l'on travaillait avec une source conventionnelle, ξ serait beaucoup plus petit que 1, par exemple 10^{-6} , et on trouverait en gros un résultat 10^6 fois plus grand. Le grand progrès est réellement dû à l'utilisation du laser.

Ces résultats sont très étonnants; ils appellent quelques remarques.

La première, c'est que chaque atome émet des photons pendant tout le temps où il est excité. Il émet A photons par seconde, A étant la probabilité d'Einstein. Chaque atome travaille donc de nombreuses fois, et le nombre de photons qu'il émet est tout simplement égal à la probabilité de transition par unité de temps A multipliée par la durée d'interaction T_i avec le rayonnement excitateur. La probabilité de transition par unité de temps, c'est l'inverse de la durée de vie τ de l'état excité. En gros, la durée d'interaction T_i dans des conditions réalistes peut être une microseconde, quelques microsecondes. La durée de vie est de l'ordre d'une nanoseconde. Le rapport T_i/τ est donc compris entre 100 et 1 000. C'est l'une des raisons de la grande sensibilité : non seulement presque tous les atomes travaillent, mais encore chaque atome travaille de cent à mille fois.

Certains auteurs font un premier calcul puis multiplient ensuite par 100 ou 1 000. Remarquons que ce facteur est déjà inclus dans le calcul et qu'il ne faut pas l'introduire deux fois.

Jusqu'ici, nous nous sommes placés dans le cas un peu trop simple où il n'y a que deux niveaux, c'est-à-dire où les atomes qui ont été excités du niveau 1 sur le niveau 2 ne peuvent retomber que sur le niveau 1. C'est le cas, par exemple, si l'on étudie la raie de résonance des isotopes pairs du mercure : il n'y a pas de structure hyperfine dans l'état fondamental, l'état fondamental est simple. Des travaux très remarquables ont été faits tout récemment par E. W. Otten sur des isotopes instables du mercure produits en très petite quantité avec le synchrotron du CERN, à Genève. Otten a pu étudier toute une série d'isotopes et observer des phénomènes

qui, du point de vue de la physique nucléaire, sont tout à fait fondamentaux. Il y a donc des cas où ce qui précède est vrai, mais il arrive aussi que le niveau fondamental soit double; dans ce dernier cas, les atomes ont une certaine probabilité de revenir sur un niveau qui n'est pas le niveau de départ et qui est en général métastable. Il se produit alors un phénomène bien connu sous le nom de pompage optique. Un tel pompage optique a pour effet de vider le niveau de départ très rapidement, auquel cas chaque atome ne sert qu'un très petit nombre de fois. Autrement dit, chaque atome ne peut émettre que quelques photons; le résultat précédent doit être corrigé et la sensibilité est en effet 100 ou 1 000 fois plus petite.

Autre remarque : il est très difficile de ne pas avoir du tout de lumière parasite. Il faut bien dire que dans les conditions que nous venons d'évoquer la lumière de fluorescence que l'on recueille est extrêmement faible : moins d'un photon par seconde ou quelques photons par seconde. Ne pas avoir du tout de lumière parasite, cela voudrait dire que l'on a moins d'un photon parasite par seconde. C'est difficile à réaliser. Aussi est-il nécessaire de faire un calcul en présence d'une certaine lumière parasite. Si l'on suppose, par exemple, qu'une fraction 10^{-8} de la lumière du laser parvient au détecteur sous forme de lumière parasite, on trouve que la densité minimale passe de 10^{-2} atome par cm^3 à 10 atomes par cm^3 .

Avec les procédés de détection purement optiques on peut donc déjà arriver dans certaines conditions à des sensibilités tout à fait étonnantes.

On peut imaginer d'autres procédés de détection, des procédés non optiques où l'on compte les atomes qui ont subi l'interaction. A la différence du cas précédent, chaque atome n'est alors utilisé qu'une seule fois. Mais contrairement à la détection optique, on peut compter effectivement tous les atomes ou presque tous les atomes qui ont subi une interaction; le facteur r qui était égal à $1/100$ va être égal ou presque égal à 1. Donc, dans certains cas, en particulier s'il y a du pompage optique (auquel cas chaque atome ne travaille guère qu'une fois), les méthodes de détection non optique seront supérieures aux méthodes de détection optique. Une autre propriété du comptage des atomes c'est que la discrimination à l'égard des événements parasites peut être meilleure, car il est plus facile de se protéger contre des atomes parasites que contre la lumière parasite.

On peut recenser un certain nombre de méthodes non optiques; en voici quelques-unes.

L'une d'elles consiste à ioniser les atomes qui sont dans un état excité : si l'on peut ioniser ces atomes et seulement ceux-là, chaque atome qui a subi l'interaction va former un ion et on comptera facilement ces ions.

Une autre méthode consiste à utiliser un jet atomique et à éclairer les atomes transversalement à l'aide d'un laser : quand les atomes subissent l'interaction ils sont déviés de leur trajectoire, par effet de recul, à cause de l'échange de quantité de mouvement. Le jet atomique est donc dévié et l'on peut, en comptant les atomes qui arrivent sur le détecteur, mettre en évidence le changement qui intervient quand il y a une résonance. Cette méthode est très élégante mais elle n'est pas très sensible parce que la déviation est très faible : il faut employer des jets atomiques limités par des fentes très fines, donc avec un rendement très faible en atomes utilisables.

On peut aussi utiliser la méthode de déflexion magnétique, dont nous parlerons plus en détail.

Il existe une quatrième méthode, applicable seulement aux atomes radioactifs. Elle repose sur le fait que, s'il y a du pompage optique, les atomes radioactifs, à condition aussi qu'ils aient un moment nucléaire différent de zéro, retombent dans un état où leur moment nucléaire est orienté d'une façon différente. En mesurant l'anisotropie de la radioactivité, on peut alors compter les atomes qui ont subi l'interaction. C'est une méthode très élégante qui a été développée aussi par E. W. Otten

Voici maintenant le principe de la méthode de déflexion magnétique. Nous allons supposer que nous sommes dans un cas où précisément il y a du pompage optique, ce qui est fréquent. Ce pompage peut être un pompage Zeeman ou un pompage hyperfin; nous verrons ce que cela veut dire. Dès lors, s'il y a une résonance entre les niveaux 1 et 2, il y a du pompage optique et ce pompage donne lieu à un changement dans l'état magnétique des atomes, qui produit à son tour un changement de trajectoire si les atomes traversent un champ magnétique inhomogène. C'est ce qui se passe dans l'expérience bien connue de Rabi pour la détection de la résonance magnétique. Ici, le même principe est utilisé pour la détection de la résonance optique.

La façon la plus simple de mettre en œuvre cette méthode consiste à envoyer un jet atomique à travers un aimant à six pôles, ou aimant hexapolaire, qui donne un champ non uniforme mais ayant approximativement la symétrie axiale: un tel système focalise les trajectoires des atomes qui ont un moment magnétique positif et défocalise les atomes qui ont un moment magnétique négatif. On éclaire le jet atomique transversalement, avant son entrée dans l'aimant hexapolaire, avec un faisceau laser; s'il se produit un pompage optique, les atomes qui changent d'état magnétique changent de focalisation (*fig. 3*). En comptant les atomes sur un détecteur on observe un signal.

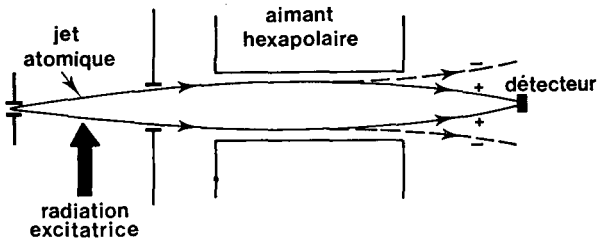


Fig. 3. — Principe de la détection du pompage optique à la résonance par focalisation magnétique.

Le détecteur indique la proportion des atomes dont l'état magnétique est « positif »; cette proportion change fortement à la résonance.

Le pompage optique, on peut tenter de l'expliquer en quelques mots.

Nous supposons d'abord qu'il n'y a pas de structure hyperfine dans l'état fondamental. Dans ce cas, on applique un faible champ magnétique et on emploie de la lumière polarisée circulairement; on a alors un mécanisme de pompage bien connu, souvent appelé pompage Zeeman et qui a été expliqué il y a longtemps par A. Kastler. On voit (*fig. 4*) que des atomes qui

étaient primitivement dans l'état « négatif », c'est-à-dire avec moment magnétique négatif, vont se trouver après l'interaction dans l'état « positif »; ils vont donc changer de trajectoire.

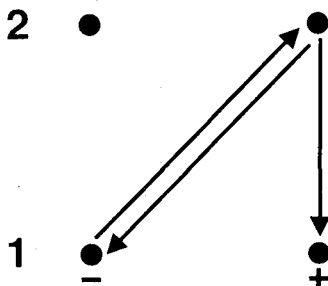


Fig. 4. — Pompage optique Zeeman.

Si, au contraire, l'état fondamental a une structure hyperfine, il se produit ce que l'on appelle un pompage optique hyperfin; par l'intermédiaire des propriétés des niveaux hyperfins dans un champ magnétique, cela donne naissance à un changement d'état magnétique qui se manifeste dans la focalisation.

Voici un exemple (*fig. 5*) d'un atome dont le niveau fondamental est double : il a un moment nucléaire, donc une structure hyperfine; le premier niveau de résonance est double aussi (c'est le cas du sodium). Considérons une transition qui va du niveau fondamental (1) vers le niveau supérieur (2). Pour un ensemble de tels atomes, les deux sous-niveaux « positif » et « négatif » sont normalement également peuplés. Si la transition d'absorption part du sous-niveau négatif, on va avoir, après pompage optique,

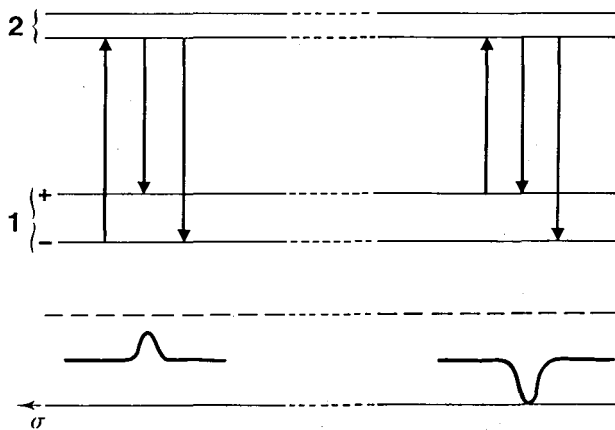


Fig. 5. — Pompage optique hyperfin et signaux correspondants obtenus par focalisation magnétique.

Le pompage à partir du sous-niveau « négatif » peut porter jusqu'à 80 % des atomes sur le sous-niveau « positif »; à partir du sous-niveau positif, il peut en porter jusqu'à 100 % sur le sous-niveau négatif.

80 % des atomes dans l'état positif et 20 % seulement dans l'état négatif. Si, au contraire, on part du sous-niveau positif et si initialement les atomes sont également répartis entre les deux sous-niveaux, après le pompage optique ils seront tous dans l'état magnétique négatif *. En l'absence de toute résonance, le détecteur (*fig. 3*) reçoit la moitié des atomes. Mais cette proportion est modifiée lorsqu'il y a résonance et l'on observe un « signal » : pour une transition partant du sous-niveau positif on obtient un signal négatif, et vice-versa.

La figure 6 montre la structure hyperfine de la raie de résonance du sodium ordinaire (^{23}Na) observée par la méthode de focalisation magnétique; on observe deux résonances qui donnent des signaux positifs, deux résonances qui donnent des signaux négatifs. C'est simplement une expérience probatoire et elle est conforme à peu de chose près à la théorie ébauchée ci-dessus. A titre d'indication quant à la résolution, en spectroscopie optique ordinaire avec élargissement Doppler, la largeur Doppler couvrirait toute la figure.

Pour montrer que cela peut être appliqué effectivement, reportons-nous maintenant à une série d'expériences qui ont été faites sur des atomes d'isotopes radioactifs du sodium. On produit ces isotopes radioactifs par des réactions nucléaires. Pour ce faire, on peut utiliser le synchrocyclotron à protons de 150 MeV d'Orsay et bombarder des atomes d'aluminium; par la réaction nucléaire de « spallation » $^{27}\text{Al}(p, 3p\alpha n)^{25-x}\text{Na}$, on forme des atomes de sodium dont le nombre de masse s'échelonne entre 25 et 21.

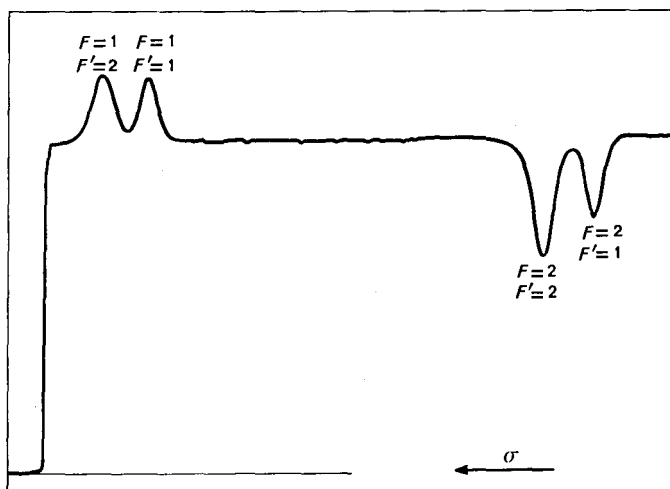


Fig. 6. — Structure hyperfine de ^{23}Na observée par la méthode associant la résonance, le pompage optique et la focalisation magnétique.

Les nombres quantiques F et F' caractérisent les sous-niveaux du niveau fondamental ($F = 1$ ou 2) et du niveau supérieur ($F' = 1$ ou 2).

* Ces résultats se déduisent de la considération du diagramme d'évolution des sous-niveaux Zeeman en fonction du champ magnétique, diagramme qui n'a pas été reproduit dans ce texte afin de ne pas le surcharger.

Si l'on veut aller plus loin, on utilise le synchrotron à protons de 24 GeVdu CERN à Genève; on bombarde une cible d'uranium et, par des réactions compliquées de fission et de spallation, il se produit de nombreux noyaux, parmi lesquels tous les isotopes du sodium.

Le tableau I donne la liste des isotopes du sodium que l'on connaît. Un seul est stable, l'isotope 23; par les réactions nucléaires on peut produire tous les autres. On a aussi indiqué les durées de vie $T_{1/2}$; certaines sont longues : 15 heures ou 26 ans, mais d'autres sont très brèves, par exemple 23 s (pour l'isotope 21), 1 s (pour le 26), 0,3 s (pour le 27), 30 ms (pour le 28). Lorsqu'on s'écarte des isotopes les plus stables, le nombre d'atomes que l'on peut produire par ces réactions nucléaires devient extrêmement faible. Malgré tout il est très intéressant de pouvoir mesurer leurs caractéristiques, à savoir leur spin nucléaire I , leur masse exacte m , leur moment magnétique nucléaire μ , leur moment quadripolaire Q et aussi leurs déplacements isotopiques. Avant les expériences que je vais vous décrire, les seuls spins connus et les seuls moments magnétiques connus étaient ceux qui sont indiqués dans le tableau I; les moments magnétiques avaient été mesurés par des expériences qui portent sur des transitions de radiofréquences; ce ne sont pas vraiment des expériences de spectroscopie optique.

TABLEAU I
Isotopes connus du sodium

A, nombre de masse; $T_{1/2}$, durée de vie; I , spin nucléaire; les masses atomiques m , moments magnétiques μ et moment quadripolaire Q connus précédemment sont indiqués par des croix. La méthode schématisée à la figure 7 a été appliquée aux isotopes 21 à 31.

A	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$T_{1/2}$	< 1 μ s	0,4 s	23 s	26 a		15 h	60 s	1 s	0,3 s	30 ms	43 ms	53 ms	17 ms	13 ms	20 ms?
I		2	3/2	3	3/2	4	5/2								
m	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
μ		x	x	x	x	x	0								
Q					x										

Dans un travail effectué en collaboration entre le Laboratoire Aimé Cotton et le Laboratoire René Bernas (Orsay), nous avons appliqué la méthode de déviation magnétique à l'étude des isotopes du sodium produits d'abord à Orsay, puis à Genève.

La figure 7 schématise le dispositif employé.

La figure 8 donne les résultats de la première expérience qui a été faite en 1975 à Orsay avec les isotopes 21, 22, 23, 24 et 25, en utilisant un laser accordable asservi dont la fréquence est très stable. Les échelles de fréquence coïncident toutes. On voit les déplacements isotopiques et la largeur de la structure qui donne l'écart entre les sous-niveaux hyperfins du niveau fondamental, écart proportionnel au moment magnétique du noyau de sodium; ces moments magnétiques sont très variables selon les isotopes.

Il était très intéressant d'aller plus loin, c'est pourquoi on a fait d'autres expériences. En juillet 1977, au CERN, on a pu mesurer les isotopes 26, 27, 28, 29, 30 et on a pu obtenir quelques indications sur l'isotope 31.

Essayons de relier la sensibilité obtenue dans les expériences précédentes à l'évaluation théorique faite au début, pour montrer que l'on obtient bien l'ordre de grandeur prévu.

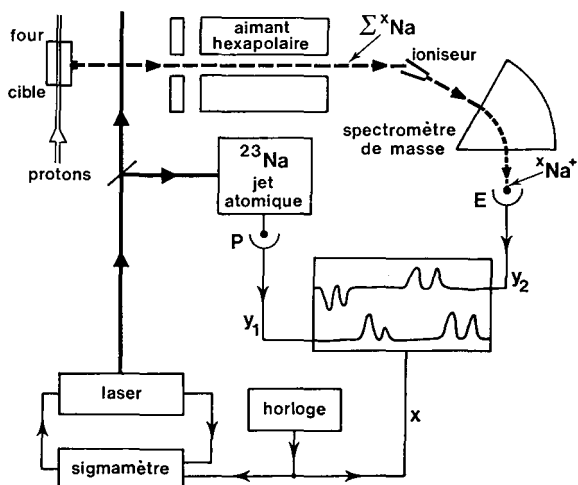


Fig. 7. — Schéma du dispositif employé pour l'étude des isotopes instables du sodium produits par réaction nucléaire.

Le jet d'atomes de Na produits par la réaction nucléaire interagit d'abord avec le faisceau laser; les atomes dont l'état magnétique est « positif » sont ensuite focalisés par le champ de l'aimant hexapolaire, puis ionisés et enfin analysés par le spectromètre de masse qui sépare les contributions des différents isotopes. Le récepteur E à multiplicateur d'électrons permet d'observer les résonances (y_2). Le laser est asservi en nombre d'ondes à l'aide du « sigmamètre »; l'horloge commande l'exploration d'un petit domaine de nombre d'ondes (x). La fluorescence du jet auxiliaire de ^{23}Na , observée à l'aide du photomultiplicateur P, fournit une référence très précise de nombre d'ondes (y_1).

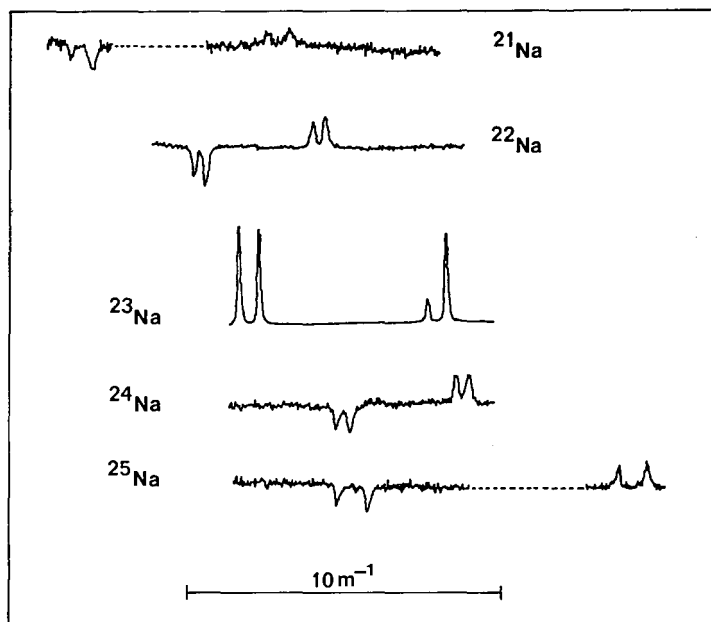


Fig. 8. — Structures hyperfines des isotopes 21 à 25 du sodium obtenues à l'aide du dispositif de la figure 7.

Sur l'enregistrement relatif à ^{23}Na , qui sert de référence et qui est obtenu par fluorescence, les signaux sont tous positifs.

Nous allons supposer que, pour avoir une statistique assez raisonnable, on compte 100 atomes pour chaque point du spectre et qu'il y a une perte d'un facteur 10 (on ne compte pas vraiment tous les atomes qui ont interagi mais on en perd neuf sur dix); il y a donc 1 000 atomes qui ont interagi. Les atomes sont produits à l'intérieur d'un four qui produit le jet atomique. Ce jet atomique occupe un certain angle solide, mais le four rayonne dans un angle beaucoup plus grand : il y a une perte considérable que l'on peut évaluer à un facteur 10^4 . Si l'on veut obtenir 50 points du spectre pour mesurer les structures hyperfines, le nombre total d'atomes « consommés » est donc de 5×10^8 . Cela n'est tout de même pas beaucoup : si l'on évalue la masse correspondante, cela fait 20 femtogrammes. Rappelons qu'en spectroscopie optique le record se situait aux environs du nanogramme, alors qu'ici nous sommes dans le domaine des femtogrammes (soit 10^6 fois moins).

On peut aussi se poser la question de la densité, du nombre d'atomes par centimètre cube qui interviennent à chaque instant dans l'expérience. Le synchrotron du CERN fonctionne en impulsions. Chaque impulsion produit des atomes radioactifs. Il faut que ces atomes sortent de la cible. La durée d'extraction est en gros de 30 ms. Pendant ces 30 ms les atomes se propagent; le volume qu'ils occupent dépend de la section du faisceau et de la vitesse des atomes. Pour produire 100 coups il faut 10 impulsions du faisceau du CERN. Si l'on introduit le volume occupé par les atomes on trouve que la densité d'atomes dans le volume étudié est de l'ordre de 1 atome par cm^3 . Mais la durée de la mesure n'est que de 300 ms par point au lieu des 10 s envisagées au début.

On voit que l'expérience confirme remarquablement les ordres de grandeur prévus théoriquement.

Les spectroscopistes traditionnels sont très étonnés par ces résultats, mais nos collègues physiciens nucléaires le sont beaucoup moins. Ils ont l'habitude de travailler avec de tels ordres de grandeur. D'où vient la différence? De ce qu'en physique nucléaire, traditionnellement, on s'arrange pour que tous les atomes étudiés travaillent effectivement, alors que, jusqu'à présent, en spectroscopie optique, on faisait un gaspillage considérable d'atomes. Maintenant, les spectroscopistes optiques ont appris à faire travailler presque tous les atomes : environ un quart d'entre eux. C'est pourquoi nous arrivons à des résultats qui sont à peu près les mêmes qu'en physique nucléaire.

P. JACQUINOT

Note du BIPM. Le texte ci-dessus résultant de l'enregistrement de la conférence, le lecteur voudra bien nous excuser d'avoir laissé quelquefois subsister le style oral.

State of research on the precise determination of silicon lattice plane spacing

1. Introduction

The aim of this lecture is to give a short review, directed mainly at those not specialized in the relevant fields of metrology and physics. The topic was chosen to illustrate the considerable progress in experimental research over the past 10 years. One may anticipate that the precise determination of the silicon lattice plane spacing will have no little effect on future fundamental metrology; this was discussed in summary articles by M. Hart and by R. D. Deslattes (Hart 1975; Deslattes 1977). The implication is correct, since there is close association between these measurements and the determination of Avogadro's constant. An even more interesting application emerges: a fundamentally new realization of the SI unit of mass, although this aspect is still very embryonic.

2. Diffraction of light and X-rays

Accurate investigations of structure can be carried out with the aid of diffraction experiments. Let us first consider the diffraction of a monochromatic plane wave of wavelength λ , incident normally on a simple

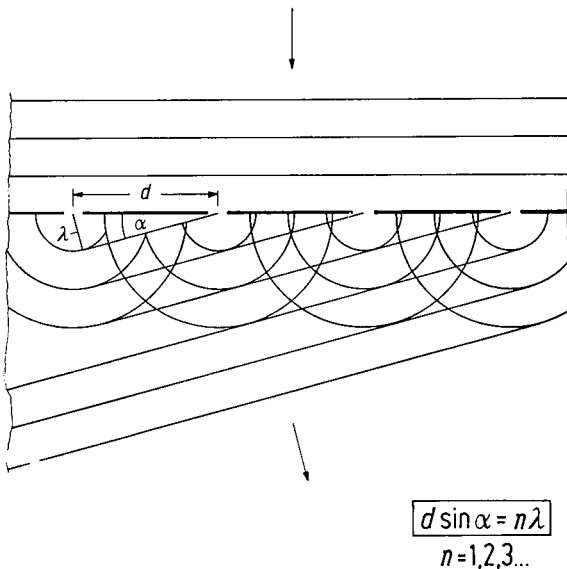


Fig. 1. — Diffraction of light by an optical grating.

optical grating with grating constant d (see figure 1). The so-called Huygen's spherical wavelets originate at the slits of this grating. As a result of interference of these wavelets, waves in the directions α according to the equation

$$d \cdot \sin \alpha = n\lambda$$

will be found, if the wavelength λ is smaller than d . Thus if α is measured for a given order of diffraction n , the grating constant d may be determined for known wavelength λ or vice versa. High precision can be realized only if d is of the same order of magnitude as λ .

For visible light, λ is of the order of 500 nm. Atomic dimensions are of the order of some tenths of a nanometre and cannot, therefore, be determined by means of optical experiments in the visible range.

Similar to the diffraction of visible light by an optical grating, X-rays are diffracted by periodically arranged atoms in a perfect crystal. This was discovered by M. v. Laue in 1912. Figure 2 shows a projection of the atoms of a silicon crystal onto one plane of its cubic unit cell with length of side a .

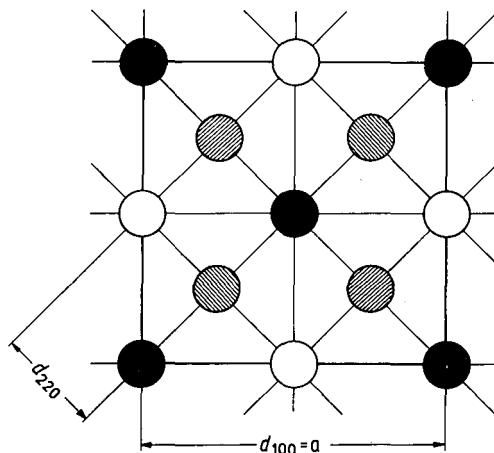


Fig. 2. — Position of atoms in a cubic unit cell of a silicon crystal.

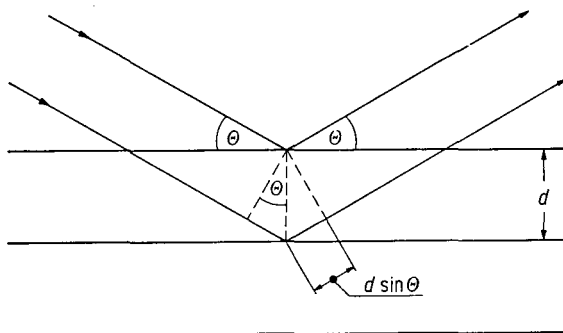
This length is called the « lattice parameter ». Atoms projected in the same manner have the same height above the basal plane. The scattered waves from the individual atoms, corresponding to the Huygens' wavelets in the above case, interfere in such a way that the resulting wavefronts propagate only in directions given by the discrete angles θ . In 1914, W. L. Bragg presented a simple explanation for this phenomenon, which considered the interference as a consequence of a mirrorlike « reflection » of the incident wave at the lattice planes of the crystal. To illustrate this, the distance between two neighbouring 220-planes, denoted « lattice plane spacing » d_{220} , is marked in the figure. From simple geometry it follows :

$$a = \sqrt{8} \cdot d_{220}$$

According to figure 3, constructive interference will occur if the direction of the incident wave is inclined at an angle θ to the lattice plane having a

spacing d and at the same time the following equation is satisfied :

$$2 d \sin \theta = n \cdot \lambda$$



$$2d \sin \theta = n \lambda$$

$$n=1,2,3\dots$$

Fig. 3. — Bragg reflection of X-rays at lattice planes.

For the same reasons as discussed above, λ must be smaller than twice the lattice plane spacing in the crystal, this means $\lambda \approx 0,1$ nm.

There are two important applications of X-ray diffraction. The first is X-ray spectroscopy, i.e. the determination of an unknown X-ray wavelength using a crystal whose the lattice plane spacing is known accurately enough from other experiments. The second is crystallographic structure analysis by means of characteristic X-ray radiation, the wavelength of which is assumed to be known accurately. Both investigations have the serious disadvantage that data from other sources is required and the accuracy of these results is limited. We are therefore interested in devising methods to determine either d or λ without knowledge of the other quantity.

3. The X-ray interferometer

Let us begin by investigating the diffraction of a monochromatic plane wave of limited cross-section, incident on a crystal of finite thickness (figure 4) at the Bragg angle θ for $n = 1$. Inside the crystal this « beam » produces a complicated wave field, resulting in only two beams emerging from the crystal: the so-called 0 beam propagating in the original direction, and the H beam propagating at an angle 2θ to the 0 beam. In order to obtain equal intensities for both beams the thickness of the crystal must be appropriately chosen.

The most remarkable feature of this diffraction phenomenon is a standing wave field in the triangular zone behind the crystal. As can be seen in the figure, its periodicity is identical with the spacing of the lattice planes irradiated by the X-ray beam. U. Bonse and M. Hart, recognizing the significance of this fact, were the first to suggest an X-ray interferometer with which d may be determined without knowing the value of λ (Bonse, Hart 1965).

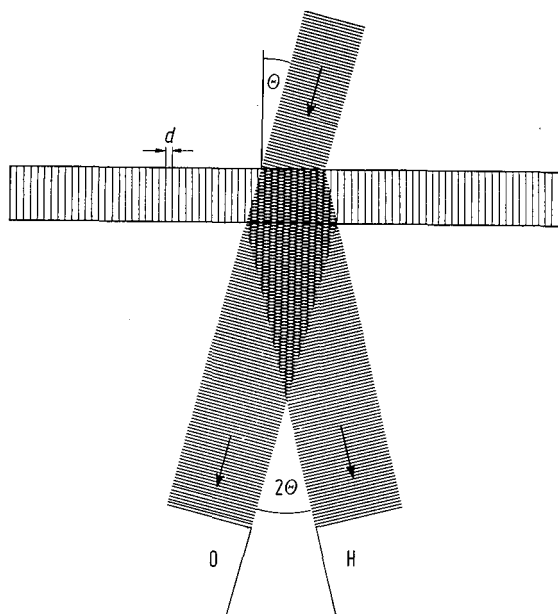


Fig. 4. — X-ray diffraction in a single crystal.
O, original beam; H, diffracted beam.

Figure 5 shows schematically the complete arrangement of the X-ray interferometer in question: the so-called « scanning X-ray interferometer ». It consists of three parallel and equidistant wafers S, M and A, cut from the same single crystal which is cut apart between M and A (Bonse, te Kaat 1968). At the top of the figure taken from (Hart 1975) one can see how the primary beam is split up by the first wafer S. The same effect occurs at the second wafer M. In this way the standing wave field behind the first wafer is reproduced in the region of the third wafer, the so-called analyser crystal A. The interaction of this wave field with the crystal lattice is an interference phenomenon which can be observed by an X-ray detector, located either in the O or in the H beam behind the crystal. Assuming that the lattice planes in the wafer A are exactly aligned with the lattice planes of S and M, a horizontal displacement of A leads to a signal which oscillates between a minimum and a maximum value whenever a displacement of $d/2$ has occurred. Proceeding in this way we are able to « scan » the crystal, that is, to count the number of lattice planes contained within the total displacement.

If the displacement is measured simultaneously using an optical interferometer for the visible range, the determination of the lattice plane spacing is achieved without having to know the wavelength of the X-rays used.

This is the basic advantage of this method over former structure determinations by X-ray diffraction, where lattice constants could only be expressed in terms of a wavelength which is not known well enough for all purposes. To cope with these shortcomings, a special unit of length, the so-called X-unit, was introduced. However, with this new method, the

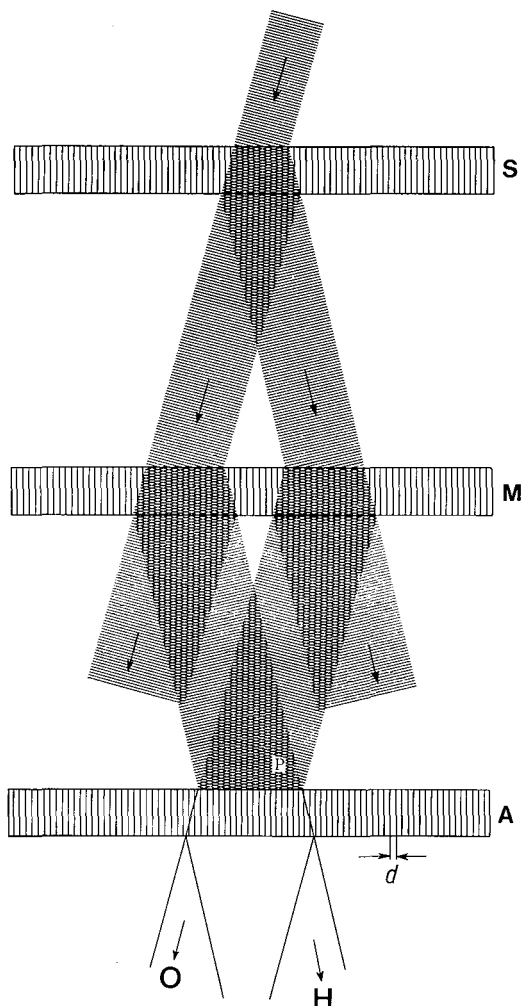


Fig. 5. — Schematic plane wave diagram for an X-ray interferometer. S, splitter crystal; M, mirror crystal; A, analyser crystal.

difficult task of determining an accurate value for the conversion factor between the X-unit and the metre will now become unnecessary (Henins, Bearden 1964; Terrien 1976).

4. *The absolute measurement of the silicon lattice plane spacing*

A prerequisite for performing interference experiments of this kind is the availability of large and dislocation-free single crystals. The increasing application of semiconductors in electronic circuits has stimulated techniques for making such crystals. Certain silicon crystals used for electronic purposes are suitable for the envisaged X-ray diffraction and interference experiments.

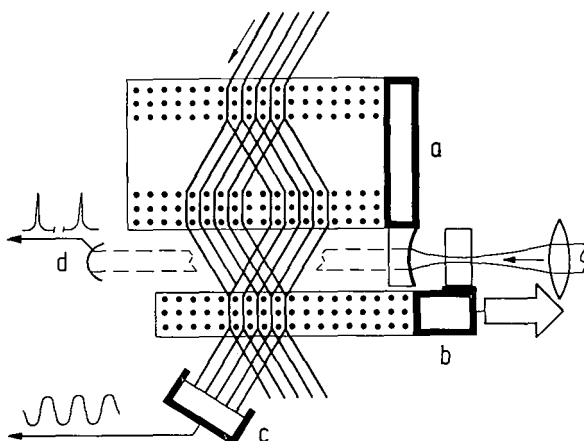


Fig. 6. — Scanning X-ray interferometer (NBS 1973).
a, stationary part; b, moving part; c, X-ray detector; d, optical detector.

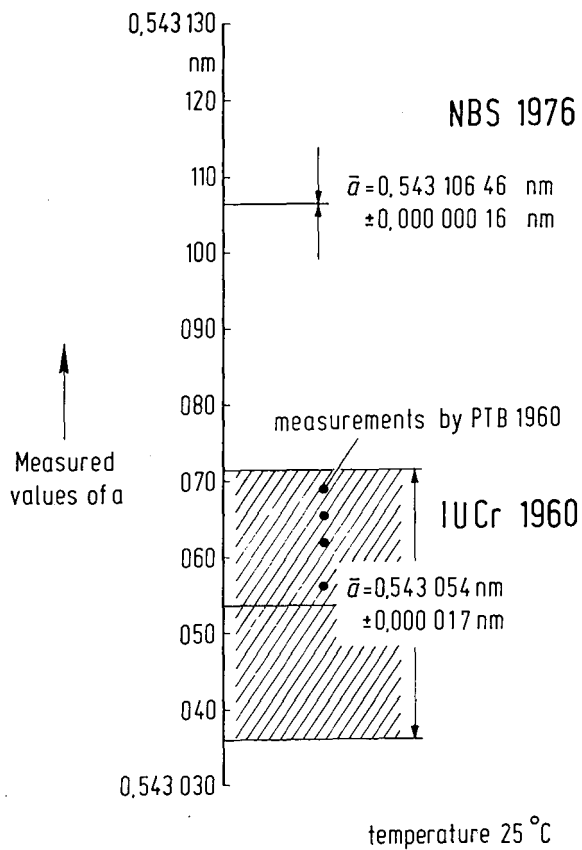


Fig. 7. — Progress in the absolute determination of the silicon lattice parameter.

As may already be seen by the originators' theoretical and experimental work (see references in (Hart 1975)), X-ray interferometry using these crystals is an excellent and versatile method. One should however bear in mind that the realization is by no means easy because of the high degree of accuracy necessary to obtain better results than those of conventional X-ray diffraction measurements.

Examples illustrating this will be given later on in connection with the discussion of an experimental device.

It is the outstanding merit of R. D. Deslattes and his collaborators at the National Bureau of Standards to have developed a high-precision scanning X-ray interferometer (Deslattes, Henins 1973); for further references see (Deslattes 1977). Their device is schematically drawn in figure 6. On the fixed part « a » and the movable part « b » of the silicon crystal, the plates of an optical Fabry-Perot interferometer for accurate measurement of the displacement are mounted. « c » is an X-ray detector and « d » an optical one. Using this device, the spacing of the lattice planes d_{220} of a silicon crystal was measured with an uncertainty of 0.3 ppm. According to these measurements, the lattice parameter at 25 °C becomes

$$a = \sqrt{8} \cdot d_{220} = 0.357 106 46 \text{ nm.}$$

The improvement introduced by the new method compared with the older ones can best be demonstrated by figure 7. The bottom of the graph shows the mean value of the lattice parameter we are concerned with, as quoted by the International Union of Crystallography (IUCr) on the basis of measurements made by 16 laboratories all over the world (Parrish 1960). The experimental values determined by H. Weyerer in the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) for this comparison are marked by dots. They all lie within the uncertainty limits.

The new value published by Deslattes can be seen in the upper part of the figure. The uncertainty of this value is so small that the graphical representation is impossible on this scale. The deviation of the former values from the new ones demonstrates clearly that the earlier values used for the X-ray wavelength were inaccurate.

Stimulated by Bonse and Hart's proposals, projects were launched in the PTB and elsewhere for a precision measurement of the 220 silicon lattice plane spacing. The work was given further impetus by the publication of the extremely successful NBS measurements. The annual PTB reports (*Jahresberichte der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt*) since 1972 indicate the progress of the project underway at the PTB in consultation with Bonse. To give an idea of the instrument and of the experimental difficulties arising in connection with the degree of accuracy to be attained, some details of this device will be given.

On the upper left of figure 8 the silicon crystals with the thin wafers S, M and A can be seen. One side of each crystal part is used as reflector for the optical measurement of the displacement of the analyser crystal A. The reflecting planes are parallel to the lattice planes to within an uncertainty of 10^{-4} radians. The problems which would be encountered with the attachment of a separate mirror can be avoided in this way.

Since the single crystal material available nowadays is so homogeneous that the local variations in the lattice plane spacings do not exceed $1 \cdot 10^{-8} \cdot d$

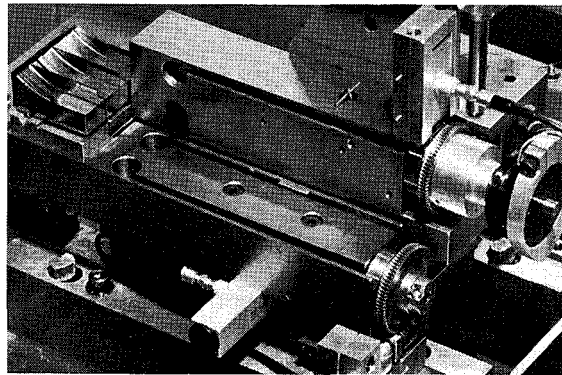
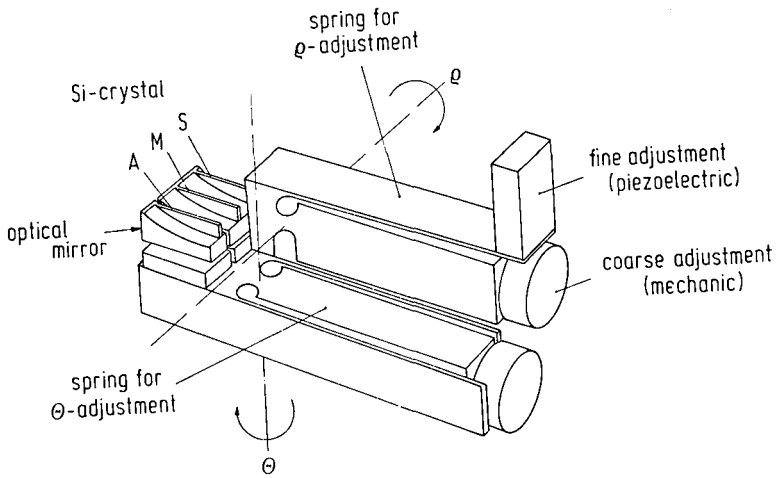


Fig. 8. — Arrangement of the scanning X-ray interferometer (PTB 1977).

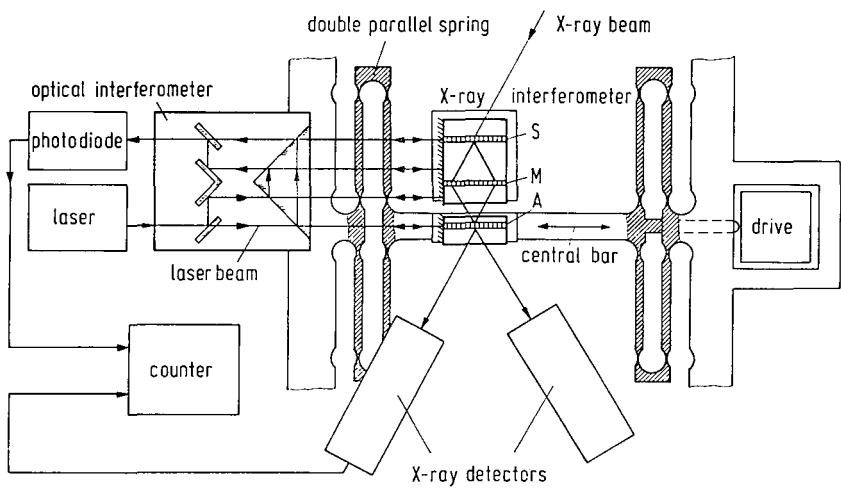


Fig. 9. — Scheme of the scanning X-ray interferometer (PTB 1975).

over a length of several millimetres, it seems feasible to carry out the interferometric measurements throughout a total displacement of the order of 1 mm. In the centre of the figure the devices for the angular alignment of the crystals are shown. Only deviations of 10^{-8} radians between the lattice planes in both crystals can be tolerated. Slight tilting can be effected reliably by the two springs with coarse mechanical and fine piezoelectric adjustment.

During the interferometric measurement the analyser crystal A must be displaced laterally in a sufficiently slow and continuous manner with reference to the fixed parts of the interferometer. For this purpose translation stages and drives are necessary with considerably higher accuracy of adjustment than normally encountered in mechanical and optical measuring devices.

A double parallel spring, shown in figure 9, is used as a precision translation stage (Bonse *et al.* 1971). This spring is manufactured from a plate of high-quality steel.

The spring elements consist of eight bars. The diminution of their cross-section causes them to act as elastic pivots. Four of these spring elements are connected to the external fixed frame, the others support the central bar with the analyser crystal. The alignment deviation of this double parallel spring is less than $5 \cdot 10^{-8}$ radians for a total displacement of 100 μm .

The displacement of the central bar is achieved by a step motor with high-reduction gearing. Using this drive displacement velocities of approximately 0,1 nm/s to 10 nm/s can be realized. The displacement direction can be reversed with negligible backlash, so that individual X-ray interference signals can be reproducibly scanned.

The left hand side of the figure shows the scheme of the optical interferometer for measuring the displacement of the analyser crystal in fractions of a metre with a relative uncertainty of about 10^{-7} . The main difficulties which arise in this measurement are the very small crystal displacement of some hundred micrometres, and the extended period of at least ten hours necessary for completion of the experiment. The resolution of the optical interferometer therefore has to be of the order of 10^{-2} nm, and its long-term stability better than 10^{-2} nm per hour.

To solve these problems a special interferometer of the Michelson type was built, as has already been developed elsewhere for the same purpose (Curtis *et al.* 1971). The optical arrangement of this instrument can be seen in figure 10. A stabilized He-Ne laser of known wavelength serves as the light source. Pockels cell and semiconductor photodetector enable precise evaluation of the interference pattern. The beams are reflected by the silicon crystals, the surfaces of which are sufficiently parallel to the lattice planes. The interferometer signal should be invariant to a mutual translation or rotation of the crystals.

This highly sensitive apparatus is very prone to disturbing vibrations, particularly the low frequency vibrations of the ground and the building. The displacement of the analyser crystal of the X-ray interferometer must be effected exactly in terms of atomic distances and practically no mechanical vibrations can be tolerated in any part of the setup. The apparatus must therefore be installed where vibration can be kept to a minimum.

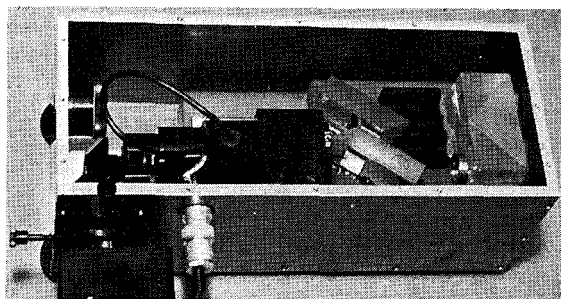
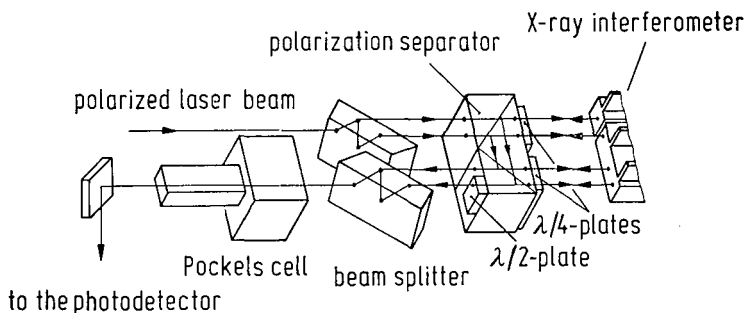


Fig. 10. — Arrangement of the optical interferometer (PTB 1977).

Moreover, the component parts capable of vibrating must be damped by viscous materials. Nevertheless, the performance of this kind of measurement with extreme demands on accuracy is by no means of easy undertaking, rather a long-term project. Although we have not as yet found a completely satisfactory solution to these problems, I hope we shall be able to give first measuring results for the d_{220} lattice plane spacing of silicon in the near future.

5. *From the silicon lattice parameter to Avogadro's constant and the unit of mass*

Avogadro's constant N_A is the number of particles in 1 mole of any substance. It can be derived from the density ρ , the mean molar mass M (numerically equal to the mean atomic weight) and the number n of atoms in an unit cell of the crystal :

$$N_A = \frac{n \cdot M}{\rho a^3} \quad (\text{For Si: } n = 8)$$

Once more a is the lattice parameter and a^3 the volume of the unit cell, cubic in our case. Having measured the lattice plane spacing to a high degree of accuracy, one still needs accurate values for M and ρ .

The mean molar mass M can be obtained on the basis of mass spectrographic and nuclear reaction data in terms of the atomic mass of ^{12}C . The density of silicon can be evaluated by a comparison with steel spheres; these can be measured accurately both in volume and mass. This was done

by Deslattes and collaborators. They evaluated

$$N_A = 6.022\,094\,1 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

with a relative uncertainty of only about 1 ppm (Deslattes *et al.* 1976).

Starting with the Avogadro number ($6.022\,094\,1 \cdot 10^{23}$, i.e. the numerical value of the Avogadro constant), the way to a possible atomic standard of the unit of mass would be quite straightforward (Deslattes 1974; Drath 1975). One would only need to state that 12 g is the mass of $6.022\,094\,1 \cdot 10^{23}$ atoms of ^{12}C . However, at present the uncertainty of the value of Avogadro's constant is still too large for it to be a reasonable alternative to the kilogram artefact at the BIPM in Sèvres. A good deal of further progress is still necessary to reduce the uncertainty of measurement of N_A by another 2 or 3 orders of magnitude.

In any event, future metrology has a fascinating task ahead in the further improvement of the evaluation of silicon lattice plane spacings. This opinion is indeed shared by J. Terrien, for 15 years the meritorious director of the Bureau International des Poids et Mesures, to whom this short lecture is dedicated.

D. KIND

References

- BONSE, U. and HART, M., Principles and design of Laue-case X-ray interferometer. *Z. Physik*, **188** (1965), p. 154.
- BONSE, U. and TE KAAAT, E., The two-crystal X-ray interferometer. *Z. Physik*, **214** (1968), p. 16.
- BONSE, U., TE KAAAT, E. and SPIEKER, P., Precision lattice parameter measurement by X-ray interferometry. Precision Measurement and Fundamental Constants, D. N. Langenberg and B. N. Taylor eds. *NBS Special Publication No. 343* (1971), p. 291.
- CURTIS, I., MORGAN, I., HART, M. and MILNE A. D., A new determination of Avogadro's number. Precision Measurement and Fundamental Constants, D. N. Langenberg and B. N. Taylor eds. *NBS Special Publication No. 343* (1971), p. 285.
- DESLATTES, R. D. and HENINS, A., X-ray to visible wavelength ratios. *Phys. Rev. Let.*, **31** (1973), p. 972.
- DESLATTES, R. D., HENINS, A., BOWMAN, H. A., SCHOONOVER, R. M. and CARROLL, C. L. and BARNES, I. L., MACHLAN, L. A., MOORE, L. J. and SHIELDS, W. R., Determination of the Avogadro constant. *Phys. Rev. Let.*, **33** (1974), p. 463.
- DESLATTES, R. D., HENINS, A., SCHOONOVER, R. M., CARROLL, C. L. and BOWMAN, H. A., Avogadro constant- Corrections to an earlier report. *Phys. Rev. Let.*, **36** (1976), p. 898.
- DESLATTES, R. D., Reference wavelengths - infrared to gamma rays, Avogadro's constant, mass and density. Int. School of Physics « Enrico Fermi », (1977) (to be published).
- DRATH, P., Das Mol- Basiseinheit für die Grösse Stoffmenge. *PTB-Mitt.*, **85** (1975), No. 1, p. 44.
- HART, M., Ten years of X-ray interferometry. *Proc. R. Soc. Lond.*, A. **346** (1975), p. 1.
- HENINS, I. and BEARDEN, J. A., Silicon-crystal determination of the absolute scale of X-ray wavelengths. *Phys. Rev.*, A. **135** (1964), p. 890.
- PARRISH, W., Results of the I.U.Cr precision lattice-parameter project. *Acta Cryst.*, **13** (1960), p. 838.
- TERRIEN, J., Standards of length and time. *Rep. Prog. Phys.*, **39** (1976), p. 1067, reproduced in *Recueil de Travaux du Bureau Int. des Poids et Mesures*, Vol. **5** (1975-76), 7 A.



NOTICE NÉCROLOGIQUE

MANUEL SANDOVAL VALLARTA

(1899-1977)

par L. CINTRA DO PRADO

A l'âge de 78 ans, Manuel Sandoval Vallarta, membre du Comité International des Poids et Mesures, est décédé le 18 avril 1977 à Mexico où il était né le 11 février 1899. Au cours de cette longue vie, il a su se dévouer, avec entrain et succès, à de multiples activités de recherche scientifique, d'enseignement supérieur, de stimulation dans les centres d'étude.

Son double patronyme fut composé selon l'usage courant en Espagne et en général dans les pays de langue espagnole, où les noms mentionnent normalement les deux souches à l'origine de chaque individu. L'appellation Sandoval lui venait de son père, don Pedro Sandoval y Gual; le second patronyme identifie la famille de sa mère, doña Isabel, née Vallarta Lyon.

Les études secondaires que le jeune Manuel Sandoval a dû poursuivre pendant une période bouleversée de l'histoire mexicaine ont raffermi non seulement son caractère, mais aussi son goût et ses aptitudes pour la physique et les mathématiques, tout en faisant mûrir, de bonne heure, une vocation scientifique orientée vers la physique théorique.

Dans ses « Réminiscences » (rédigées par lui en 1972 et reproduites, après sa mort, dans une plaquette commémorative publiée par l'Institut National d'Énergie Nucléaire du Mexique), on peut lire que le premier projet concernant ses études universitaires envisageait les cours de sciences à Cambridge (Angleterre). Ce plan fut toutefois abandonné à cause des grands dangers qu'à l'époque, vers 1916, la Première Guerre Mondiale faisait craindre pour la navigation à travers l'Océan Atlantique. C'est ainsi que, au tournant de ses 17 ans, M. Sandoval Vallarta fut envoyé à la ville américaine du même nom, Cambridge, pour se présenter aux examens d'admission du Massachusetts Institute of Technology (MIT). Il y fut reçu sans aucune difficulté; non seulement reçu, mais de fait, parmi de très nombreux candidats — et malgré la condition plutôt défavorable de sa nationalité étrangère — il se fit déjà remarquer comme le conquérant du deuxième poste dans le classement général.

Engagé aisément dans la vie universitaire de cette institution, les manifestations naturelles de son esprit vraiment supérieur lui ont fait mériter par la suite le privilège d'un long séjour au MIT, d'environ 30 années, d'abord comme étudiant, et après 1924 comme membre du corps enseignant. Les avancements rapides dans sa carrière sont la preuve de l'estime et de la réputation dont il a toujours joui. Et ce fut de son propre gré qu'en 1946

il renonça au poste de professeur titulaire (*full professor*) à temps complet, afin de pouvoir rester plus longuement au Mexique et de s'y adonner aux tâches de responsabilité que ses compatriotes tenaient à lui confier.

Au terme régulier du premier cycle universitaire, en 1921, M. Sandoval Vallarta reçoit le titre de *Bachelor of Science* et, aussitôt après, se remet au travail pour la préparation de son doctorat. Il s'occupe plus particulièrement du calcul opérationnel d'Oliver Heaviside, en exerçant les fonctions d'assistant du Professeur Bush chargé de l'enseignement de l'électrotechnique au MIT. En étroite collaboration, les deux chercheurs réalisent des expériences nombreuses et variées avec des maquettes de lignes de transmission. Leurs observations aboutissent à la première et éclatante vérification des formules de Heaviside, jusque-là tenues plutôt comme de pures divagations théoriques.

En même temps, M. Sandoval Vallarta suivait d'autres cours en parallèle. Dans ses « Réminiscences » et ailleurs, il rend justice aux salutaires influences exercées sur sa formation par certains professeurs, en particulier Edwin B. Wilson, remarquable mathématicien qui a beaucoup contribué à la diffusion de l'analyse vectorielle, et Norbert Wiener, auteur des fondements mathématiques de la cybernétique.

A cette époque-là, il y avait réciprocité entre les cours du MIT et ceux de Harvard University. Cette circonstance se trouve à l'origine des liens d'amitié et de collaboration entre M. Sandoval Vallarta et deux élèves de Harvard, Robert Oppenheimer et Georges Lemaitre. Ce dernier allait devenir, plus tard, son partenaire pour les recherches sur l'effet géomagnétique des rayons cosmiques.

En 1924, M. Sandoval Vallarta obtint son grade de Docteur en Philosophie (Ph.D.) décerné par le MIT. Trois ans plus tard, une bourse de la Fondation Guggenheim lui donnait l'occasion de faire un stage à l'Université de Berlin, où les professeurs de physique étaient Albert Einstein, Erwin Schrödinger, Max von Laue, Max Planck, et encore von Neumann, Wigner et d'autres. Comme on sait, à cette époque avaient eu lieu les développements décisifs des nouvelles mécaniques, ondulatoire et quantique. M. Sandoval Vallarta eut donc la fortune d'avoir connu personnellement de très hauts représentants de la science à une période vraiment sensationnelle de son histoire. Son séjour à Berlin fut suivi d'une année à Leipzig, avec les groupes de recherches autour de Werner Heisenberg et de Peter Debye.

A son retour au MIT, M. Sandoval Vallarta est nommé Professeur Associé, et en 1939 il devient *Full Professor*. Il se rendait assez fréquemment au Mexique et c'était là qu'il passait les vacances d'été. Sa participation directe à la vie scientifique de son pays grandissait toujours. En 1946, il fixa sa résidence permanente au Mexique. Tout en contribuant activement à la stimulation des physiciens et des activités scientifiques de son pays par la coordination des recherches et l'organisation de séminaires et réunions d'étude, il garda et multiplia même ses contacts avec les centres d'étude aux États-Unis, au Canada et dans un grand nombre de pays d'Europe et d'autres continents.

Ainsi que l'écrit le Dr Marcos Moshinsky de l'Institut de Physique de l'Université de Mexico, « le point auquel M. Sandoval Vallarta a porté peut-être la plus grande attention, dès son retour au Mexique, fut le souci d'établir une tradition scientifique solide et vigoureuse dans le domaine

de la physique » (*Revista Mexicana de Fisica*, 24, 1975, pp. 11-13). A cet effet, outre les innombrables cours et conférences de haut niveau donnés au Colegio Nacional de l'Université, « sa présence était devenue légendaire, et l'on comptait sur lui à presque toutes les séances de la Société Mexicaine de Physique dont les réunions avaient lieu en divers points du pays ». M. Sandoval Vallarta eut un rôle marquant comme initiateur en 1950, puis comme animateur, du cycle de séminaires hebdomadaires qui se poursuit encore actuellement. Les travaux de presque tous les physiciens mexicains ont bénéficié de ses commentaires critiques et bienveillants.

Au cours de sa carrière scientifique, M. Sandoval Vallarta s'est intéressé à plusieurs branches de la physique théorique, y compris la relativité générale et l'électromagnétisme. Il a publié plus d'une centaine de mémoires scientifiques dans des revues et périodiques de plusieurs pays. Il se fit connaître surtout par les travaux qu'il entreprit dès 1932 sur la distribution de l'intensité du rayonnement cosmique.

Selon ses propres mots, l'événement critique qui a poussé l'orientation majeure de ses recherches fut la découverte de l'effet de latitude, observé par Jacob Clay et reconfirmé par Arthur Compton en 1932. Quelque temps auparavant, Georges Lemaître avait proposé une théorie sur l'énergie universelle en postulant que, il y a très longtemps, un petit noyau initial d'énorme énergie aurait explosé, dispersant dans l'espace une multitude innombrable de particules chargées et de photons, dont l'énergie diminue toujours en raison de l'expansion de l'Univers. Le rayonnement cosmique serait une retombée de tels corpuscules. Et l'effet alors découvert, la variation de l'intensité de ce rayonnement avec la latitude — Lemaître et Sandoval Vallarta l'ont entrevu — pourrait s'expliquer par la déviation des particules chargées et soumises au champ géomagnétique. Ils se mirent à travailler ensemble à la vérification de cette hypothèse.

Sur la valeur et la portée de cette œuvre, H. Elliot en donne une appréciation succincte (*Nature*, 267, 9 June 1977, p. 566), dont voici une traduction qui n'est pas littérale.

« Conjointement, l'Abbé Lemaître et Sandoval Vallarta ont effectivement résolu, jusqu'au premier ordre, le problème de la distribution d'intensité, et cela a été fait en deux étapes. D'abord, pour les trajectoires des particules (en considérant la possibilité d'atteindre la surface de la Terre), ils ont prévu les directions permises et les directions interdites, qu'ils ont déterminées par une généralisation du procédé de calcul établi par C. Störmer, en se servant au MIT d'un nouvel analyseur différentiel de Bush. Ensuite, par une élégante application du théorème de Liouville (de la mécanique statistique), lui et Lemaître ont montré que, pour un flux cosmique isotrope, l'intensité près de la Terre, dans une direction permise, est la même que celle qui existe hors du champ magnétique, tandis qu'elle est nulle dans les directions interdites.

« Leur travail a fourni la base pour nous faire comprendre un grand nombre d'effets géomagnétiques du rayonnement cosmique, et a conduit directement à deux résultats particulièrement importants. Le premier, c'est qu'en faisant la prévision d'une asymétrie Est-Ouest dans l'intensité aux basses latitudes géomagnétiques, asymétrie qui serait dans un sens ou dans l'autre selon le signe électrique du rayonnement primaire, leur travail a permis de vérifier, par des expériences, qu'il y a dans les particules

primaires une prédominance de charges positives. Un autre résultat est que les calculs d'énergie de *cut off* géomagnétique (en tant que fonction de la position par rapport au dipole) — calculs qui ont été faits en grand détail par Sandoval Vallarta et ses élèves (R. Feynman, L. Bouckaert, O. Godart, Albagli, S. Kusaka, A. Baños, C. Graef Fernández, et beaucoup d'autres, *Note du traducteur*) — ont permis une première détermination de l'allure du spectre énergétique des rayons cosmiques, dans la région géomagnétique sensible. Signalons encore que l'utilisation du théorème de Liouville, dont Lemaitre et Sandoval furent les pionniers dans ce contexte, a pu être étendue au-delà du champ des rayons cosmiques. Son application se fait maintenant dans le cas général du mouvement de particules chargées dans les champs magnétiques de tous genres, qu'il s'agisse d'accélérateurs de laboratoire, de machines à confinement des plasmas, ou d'autres situations où des particules sont accélérées ou confinées dans des champs magnétiques produits par des objets astronomiques très variés. »

M. Sandoval Vallarta fut élu au CIPM, par cooptation, en avril 1960; la même année, son élection était confirmée par la 11^e Conférence Générale des Poids et Mesures. Il a toujours participé activement aux travaux du CIPM où tous ont pu apprécier sa compétence, la lucidité de son jugement et sa grande courtoisie. En octobre 1969, il fut désigné comme membre du Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants, où il siégeait dans le groupe de six membres chargé de la coordination des programmes de travail de ce Comité Consultatif. Il était aussi, depuis 1965, membre du comité de rédaction de la revue *Metrologia*, éditée sous les auspices du CIPM.

Il a beaucoup contribué au développement des institutions scientifiques aussi bien qu'à l'enseignement et à la formation des jeunes générations au Mexique. Parmi les positions qu'il a occupées dans son pays, on peut citer: directeur de l'Instituto Politécnico Nacional, coordinateur des sciences à l'Université Nationale Autonome du Mexique, président de l'Institut National pour la Recherche Scientifique, membre de la Commission Nationale de l'Énergie Nucléaire, Sous-Secrétaire de l'Éducation, membre du Conseil Consultatif de la Commission Nationale de l'Espace Extérieur. De même, il a exercé des fonctions dans des entités hors du Mexique et auprès d'organisations internationales; c'est ainsi qu'il assumait la présidence du Conseil Latino-Américain du Rayonnement Cosmique, du Conseil Scientifique du Centre International de Physique Théorique à Trieste, du Conseil Latino-Américain de Physique de l'Espace, de la XII^e Conférence Générale de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique, de la Commission d'Énergie Atomique des Nations Unies, et d'autres encore.

M. Sandoval Vallarta a été appelé, en de très nombreuses occasions, à donner des cours complets ou des conférences, soit à des universités, soit à des institutions spécialisées de recherche, en Amérique du Nord, en Amérique Latine, en Europe, en Inde, au Japon. Il a été reçu, comme invité d'honneur, à grand nombre de congrès et colloques d'études.

On lui a décerné partout des honneurs académiques. Outre ceux des Universités mentionnées ci-dessus, citons encore: membre du Colegio Nacional de Mexico, de la Pontificia Accademia delle Scienze (Vatican), de l'American Academy of Arts and Sciences; il était Chevalier de la Légion d'Honneur (France).

On ne peut rendre hommage à la mémoire de Manuel Sandoval Vallarta sans évoquer ses remarquables qualités intellectuelles et morales, jointes à une simplicité charmante, qualités que l'on retrouvait dans son action pour le progrès des institutions pour lesquelles il a travaillé. Son œuvre scientifique et l'accomplissement de ses tâches comme professeur et chef d'équipe sont des exemples qui ont inspiré ses élèves et qui peuvent être imités par d'autres dans les centres d'étude et de recherche.

Au Comité International des Poids et Mesures, de même que dans tous les milieux scientifiques et pédagogiques, sa disparition est vivement regrettée par tous ceux qui l'ont connu; ils perdent en lui non seulement un collègue et un collaborateur éminent, mais aussi et surtout un authentique ami doué d'une très haute valeur humaine.

INDEX

- Balances, A 12
Base géodésique, 25
Bâtiments
 dépendances, 22
 Grand Pavillon (salle de conférences; bureaux), 22
 Observatoire (monte-charge; canalisations; sous-sol salle 3), 21-22
 Petit Pavillon (appartement de fonction), 22
Budget 1978, 13
Certificats, Notes d'étude, 68
Comités Consultatifs
 composition, 9
 Définition de la Seconde, 3; rapport 8^e session, S 1
 Photométrie et Radiométrie, 5; rapport 9^e session, P 1
 Rayonnements Ionisants, 4; rapport du président, R 1
 Section I, 4, R 3
 Section II, 5, R 7
 Section III, 5, R 12
 réunions futures, 10
Comité International
 bureau du, 3
 composition, VII
 décès (M. Sandoval Vallarta), 2, XI
 démission (J. Stulla-Götz), 18
Comparaisons internationales
 débit de fluence de neutrons mono-cinétiques rapides, 62
 étalons calorimétriques de dose absorbée, 47
 étalons de capacité électrique 10 pF, 43
 étalons électriques Ω , 39; V, 42
 étalons d'exposition, 45
 étalons à traits, 23
 solution ^{139}Ce , 49
 sources ^{60}Co , 51
Comparateur photoélectrique et interférentiel, 23
Comptes, 3, 78
Convention du Mètre
 adhésion Rép. Pop. de Chine, 1, 2; cotisation pour 1977, 18
 désignation des organes de la, 17
Correction de poussée de l'air, A 17
Dépôt des prototypes métriques, visite, 15
Documentation, 70
Échelles de temps (*voir* Temps)
Effet Josephson, 40
Efficacité lumineuse spectrale (K_m), 7, P 6, P 20
Électricité, 39
 conservation unité de f.é.m., 40
 enceintes thermorégulées, 41
 enquête sur représentation et conservation des unités, 43
 étalons capacité 10 pF, 43
 étalons nationaux Ω , 39; V, 42
Électrons, expériences pour mesure \bar{W} , 48
Étalons
 atomiques de fréquence, progrès, S 3
 électriques (*voir* Électricité)
 longueur
 à bouts, 24
 à traits, comparaisons internationales, 23; 24
 N° 5 pour mesure g , 25
 masse, conservation des, 30; réunion internationale sur, 8, 32, A 1
 photométriques, comparaisons futures, P 18
Exposés scientifiques, B 1
Grandeurs comportant un facteur biologique (unité des), 6, P 3, P 20
Gravimétrie, 34; au BIPM, B 5
 gravimètre absolu transportable, mesures avec, 34
 station de Mizusawa, 34
Groupes de travail
 incertitudes, 15
 masses, 32
 pilotage du TAI, S 11
Incertitudes, groupe de travail sur, 15
Interférométrie, 25
 comparaison de λ , 29
Kilogramme prototype, N° 2 (Roumanie), 29

- Lasers, 25
 asservis sur I_2 , 27; sur « Lamb-dip »,
 28; sur CH_4 , 28
- Longueurs, 23
- Manométrie, 38
- Masses, 29
 conservation des étalons de, (étui
 spécial), 30
 cylindres en Pt-Ir, masse volumique,
 30
 réunion internationale sur, 8, 32;
 rapport, A 1
- Mesures neutroniques, R 12
 débit de fluence de neutrons mono-
 cinétiques rapides, comparaison
 internationale, 62
 enregistrement de données sur cassettes
 à ruban magnétique, 63
 source de neutrons de 14,7 MeV,
 63
- Metrologia*, 18
- Neutrons (*voir* Mesures neutroniques)
- Notices
 historique, V
 nécrologique (M. Sandoval Vallarta),
 XI
- Organes de la Convention du Mètre,
 désignation, 17
- Organismes internationaux et nationaux,
 travaux en liaison avec, 70
- Personnel du BIPM
 engagements, 21
 liste du, IX
 nominations, 21
 retraite du directeur J. Terrien, 14,
 20, B 1; nomination directeur
 honoraire, 19
 voyages, visites, conférences et exposés,
 71
- Photométrie et radiométrie, 44
 Comité Consultatif, 5; rapport 9^e
 session, P 1
 comparaisons futures d'étalons, P 18
 efficacité lumineuse spectrale (K_m), 7,
 P 6, P 20
 filtres $V(\lambda)$, P 12
 lampes étalons, améliorations, P 12
 recommandations, du CCPR, P 20
 redéfinition des unités, 6, P 4, P 21
 travaux dans laboratoires nationaux
 P 14; sous égide CIE, P 13
- Publications
 du BIPM, 66; diffusion, 18; offre de
 collections, 66
 extérieures, 66
 rapports internes, 67
- Questions administratives, 13
- Radiométrie (*voir* aussi Photométrie)
 absolue, progrès P 9
- Radionucléides, 49, R 7
 chambre d'ionisation $4\pi\gamma$, 52
 ensemble de comptage par coïncidences
 $4\pi\beta$ (CP)- γ , 50
 solution ^{138}Ce , comparaison interna-
 tionale mesures d'activité, 49
 sources ^{60}Co , comparaison de mesures
 d'activité, 51
 sources solides (^{60}Co , ^{54}Mn), étalon-
 nage et distribution, 50
 spectrométrie α , 60
 statistiques de comptage, 55
 système international de référence
 pour mesures d'activité γ , 53
- Rayonnements Ionisants, rapport du
 président du Comité Consultatif, R 1
- Rayonnement γ ^{60}Co , 45
 dose absorbée dans graphite, 45
 détermination ionométrique du débit,
 45
 étalons calorimétriques, comparaisons
 internationales, 47
- Rayons X, comparaison étalons d'expo-
 sition, 45
- Rayons X et γ , R 3
- Recommandations
 CC Définition de la Seconde, S 11
 CC Photométrie et Radiométrie, P 20
- Seconde, Comité Consultatif, 3; rapport
 8^e session, S 1
- Silicium, distance réticulaire, B 23
- Spectrométrie α
 mesures de contrôle avec sources de
 ^{242}Cm , 61
 spectrographe, étalon de longueur, 60
- Spectroscopie, exposé sur, B 10
- Statistiques de comptage
 effet Gandy pour temps mort cumu-
 latif, 57
 espérance et variance du nombre
 d'impulsions enregistrées, 55
- Système International d'Unités, pro-
 grès, 70
- Temps
 atomique international (TAI), 3, 33,
 S 5
 échelle libre, 33
 établissement et diffusion, limitations
 dans, S 5
 pilotage, 4, 34, S 7, S 11
 recommandation du CCDS, S 11
 universel coordonné (UTC), S 6
- Thermométrie, 35
 points triples (méthane, eau), 35-37

thermomètres du type capsule, 37; cellules scellées pour, 37	photométriques (lm, cd), 6, P 4, P 21
Travaux du BIPM, 23; exposé sur, 11	Système International d', progrès, 70
Unités des grandeurs comportant un facteur biologique, 6, P 3, P 20	Visites et stages au BIPM, 74 Voyages, visites, conférences et exposés du personnel, 71

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

66^e Session (Septembre 1977)

	Pages
Notice historique sur les organes de la Convention du Mètre	v
Liste des membres du Comité International	VII
Liste du personnel du Bureau International	IX
Ordre du jour de la session	X
Procès-verbaux des séances, 20-22 septembre 1977	1
Ouverture de la session; adhésion de la République Populaire de Chine; décès de M. Sandoval Vallarta	1
<i>Rapport du Secrétaire du CIPM (Convention du Mètre: adhésion de la République Populaire de Chine. Membres du CIPM: décès de M. Sandoval Vallarta. Réunions de Comités Consultatifs et réunion sur les masses. Bureau du CIPM. Indications financières)</i>	2
<i>Rapports des Comités Consultatifs; rapport sur la réunion concernant les masses:</i>	
<i>Définition de la Seconde (8^e session) (Progrès des horloges atomiques et des étalons de fréquence à jet de césium. Ajustement, le 1^{er} janvier 1977, de l'intervalle unitaire de 1 s du TAI. Établissement et pilotage du TAI par le BIH; approbation de la Recommandation S 1 (1977))</i>	3
<i>Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants (Présentation et approbation du rapport du président du CCEMRI sur les travaux des Sections I, II, III)</i>	4
<i>Photométrie et Radiométrie (Discussion sur les propositions de changement de définition des unités photométriques et sur les unités des grandeurs comportant un facteur biologique. Adoption de la Recommandation P 2 (1977) recommandant l'emploi de la valeur 683 lm/W pour l'efficacité lumineuse spectrale. Les Recommandations P 1, 3 et 4 sont renvoyées au CCU pour étude)</i>	5
<i>Réunion internationale sur les masses (Étalons de masse, balances, corrections aux pesées, Groupes de travail)</i>	8
Composition et réunions futures des Comités Consultatifs (CCPR: IEN (Italie), J. Schanda (Budapest); démission du président A. Maréchal. CCEMRI, Section II: NPRL (Afrique du Sud), J. J. Gostely (Lausanne) et H. Vonach (Vienne); Section III: LMRI (France). Remarques au sujet de la composition des Comités Consultatifs)	9

Travaux du BIPM (<i>Exposé sur les principales activités scientifiques</i>)	11
Questions administratives: Approbation des comptes de l'exercice 1976. Remarques sur l'exercice 1977 en cours. Adoption du budget pour 1978	13
Retraite du directeur J. Terrien; conférence scientifique; réception au Pavillon de Breteuil	14
Visite du dépôt des Prototypes métriques	15
<i>Questions diverses:</i>	
— Groupe de travail sur les incertitudes	15
— Emploi temporaire du barn (<i>Position du CIPM</i>)	16
— Désignation de l'ensemble des organes de la Convention du Mètre (<i>Proposition à soumettre à la prochaine Conférence Générale</i>)	17
— Cotisation de la République Populaire de Chine pour 1977	18
— <i>Metrologia</i>	18
— Publications du BIPM (<i>Diffusion</i>)	18
— Mr J. Stulla-Götz annonce sa démission	18
— Dates de la 16 ^e CGPM et de la 67 ^e session du CIPM	19
Nomination de Mr J. Terrien comme directeur honoraire	19
Dîner en l'honneur de Mr Terrien	20
Rapport du directeur sur l'activité et la gestion du Bureau International des Poids et Mesures (octobre 1976 — septembre 1977)	21
I. PERSONNEL. — Nominations (<i>P. Giacomo, J. Bonheure, T. Witt, G. Girard, P. Bréonce</i>). Engagements (<i>T. J. Quinn, R. Felder</i>)	21
II. BÂTIMENTS. — Observatoire (<i>Installation d'un monte-charge et d'un réseau d'éva- cuation des eaux usées en sous-sol; aménagement du sous-sol de la salle 3</i>). Grand Pavillon (<i>Réfection de la Salle de conférences</i>). Petit Pavillon (<i>Réfection du logement de fonction</i>). Dépenses	21
III. INSTRUMENTS ET TRAVAUX	23
Remarques générales	23
Longueurs. — Comparateur photoélectrique et interférentiel (<i>Enregistrement de données numériques sur ruban magnétique</i>)	23
Étalons à traits (<i>Comparaisons internationales de deux règles divisées (1 m et 0,5 m). Règles N° 4795 [Pologne], N° 46 [Roumanie]</i>)	23
Étalons à bouts (<i>Calibres [Suisse, France, Tchécoslovaquie]; étalons cylindriques [États-Unis]. Étalon N° 5 pour la mesure de g</i>)	24
Base géodésique (<i>Invar. Démontage des installations de la base pour travaux</i>)	25
Interférométrie. — Lasers asservis sur l'absorption saturée de I ₂ et CH ₄ (<i>Remarques générales</i>)	25
Lasers asservis sur I ₂ (<i>Améliorations; stabilité à long terme; comparaisons</i>)	27
Étalonnage de lasers asservis sur le Lamb-dip	28
Lasers asservis sur CH ₄ (<i>Caractéristiques de deux lasers construits au BIPM</i>)	28
Comparaison de λ de quatre radiations du ¹⁹⁸ Hg à λ étalon (⁸⁶ Kr)	29
Divers	29
Masses. — Kilogrammes prototypes (<i>Masse du Kilogramme N° 2 [Roumanie]; masse volumique de trois cylindres en Pt-Ir</i>)	29
Conservation des étalons de masse (<i>Influence des nettoyages et lavages. Essai d'un nouveau type d'étui</i>)	30

Études courantes (<i>Étalons pour la Roumanie, la France, le Nigéria et le BIPM</i>) ...	31
Divers (<i>Achats d'appareils; don par le NBS de deux cristaux de silicium</i>)	32
Échelles de temps. — Temps Atomique International (<i>Échelle libre; durée de l'intervalle unitaire, pilotage</i>)	33
Gravimétrie. — Station gravimétrique de Mizusawa (<i>Poursuite de la collaboration du BIPM pour l'établissement de cette station</i>)	34
Gravimètre absolu transportable (<i>Nouvelles stations gravimétriques; résultats</i>) ...	34
Thermométrie. — Échelle Internationale Pratique de Température (<i>Réalisation du point triple du méthane. Étalonnage des thermomètres du type capsule. Comparaison de cellules à point triple de l'eau d'origines différentes. Cellules scellées pour thermomètres du type capsule. Thermocouples</i>)	35
Études courantes	38
Manométrie. — Manobaromètre interférentiel (<i>Résision complète de l'appareil du BIPM</i>). Études courantes	38
Électricité. — Comparaison de représentations nationales de l'ohm (<i>Rattachement de Ω_{ASMW} à Ω_{69-BI}. Comparaison restreinte d'étalons nationaux de résistance. Comparaison de Ω_{69-BI} à Ω_{NML}</i>)	39
Conservation de l'unité de force électromotrice (<i>Effet Josephson. Construction d'enceintes thermorégulées pour piles étalons. Potentiomètre. Appareils construits au BIPM</i>)	40
Comparaison de représentations nationales du volt (<i>Rattachement de V_{ASMW} à V_{76-BI}. Comparaison restreinte d'étalons nationaux. Rattachement de V_{NPL} à V_{76-BI}</i>)	42
Enquête sur la représentation et la conservation des unités de résistance et de f.é.m. par les grands laboratoires nationaux (<i>Envoi d'un questionnaire</i>)	43
Comparaison internationale circulaire des étalons de capacité en silice de 10 pF (<i>Situation</i>)	43
Études courantes. Équipement	43
Photométrie. — Installations de mesure (<i>Récepteurs photoélectriques</i>). Études courantes	44
Rayons X et γ , électrons. — Rayons X: Comparaison entre les étalons d'exposition du NPL (Afrique du Sud) et du BIPM	45
Rayonnement γ du ^{60}Co : Nouvel étalonnage de deux chambres de transfert (Suède). Mesure de la dose absorbée dans le graphite (<i>Détermination ionométrique du débit de dose absorbée. Comparaisons internationales d'étalons calorimétriques (NBS et LMRI) à l'étalon ionométrique du BIPM</i>)	45
Électrons: Expériences préparatoires à la mesure de \overline{W} (<i>Source d'électrons; chambre d'ionisation</i>)	48
Radionucléides. — Étalonnage de sources radioactives:	
Comparaison internationale de mesures d'activité d'une solution de ^{138}Ce ..	49
Ensemble de comptage par coïncidences $4\pi\beta(\text{CP})-\gamma$	50
Étalonnage et distribution de sources solides	50
Mesures de l'activité de sources de ^{60}Co à taux de comptage élevés; participation à une comparaison organisée par le NPL	51
Mesures relatives d'activité au moyen d'une chambre d'ionisation $4\pi\gamma$ à pression (<i>Stabilité; réponse des chambres en fonction de l'énergie des photons; système international de référence pour la mesure d'activité d'émetteurs de rayons γ</i>) ..	52
Statistiques de comptage:	
Résultats asymptotiques pour l'espérance et la variance du nombre d'impulsions enregistrées	55
L'effet Gandy pour un temps mort cumulatif	57
Autres travaux	60

Spectrométrie α (<i>Nouvel étalon de longueur du spectrographe. Mesures de contrôle avec des sources de ^{242}Cm</i>)	60
<i>Mesures neutroniques. — Comparaison internationale des mesures de débit de fluence de neutrons rapides monocinétiques</i>	62
Source de neutrons de 14,7 MeV du BIPM	63
Enregistrement de données sur cassettes à ruban magnétique	63
Publications du BIPM	66
Publications extérieures	66
Rapports internes	67
Certificats et Notes d'étude	68
IV. ACTIVITÉS ET RELATIONS EXTÉRIEURES	70
Documentation; Système International d'Unités	70
Travaux en liaison avec des organismes internationaux et nationaux	70
Voyages, visites, conférences, exposés du personnel	71
Visites et stages au BIPM	74
V. COMPTES	78
Rapport du Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (8^e session-1977) au CIPM, par B. Guinot	S 1
Rapport du président du Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants au CIPM, par E. Ambler	R 1
Rapport du Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (9^e session-1977) au CIPM, par E. J. Gillham	P 1
Rapport sur la réunion concernant les masses (23-24 novembre 1976), par T.J. Quinn .	A 1
Séance spéciale du CIPM (21 septembre 1977) en hommage à Jean Terrien	B 1
J. Terrien, le BIPM et le SI, par J. de Boer	B 2
La gravimétrie au BIPM, par J. Coulomb	B 5
Spectroscopie à haute résolution et à haute sensibilité, par P. Jacquinet	B 10
State of research on the precise determination of silicon lattice plane spacing, par D. Kind	B 23
Notice nécrologique	
M. Sandoval Vallarta, par L. Cintra do Prado	XI
INDEX	XVII