

Bureau international des poids et mesures

Conférence générale des poids et mesures

21^e session (octobre 1999)

Note sur l'utilisation du texte anglais (voir page 209)

Les comptes rendus de la Conférence générale sont présentés en anglais en même temps qu'en français. Il n'en demeure pas moins que la version officielle, en particulier des résolutions adoptées par la Conférence, est celle en langue française.

The proceedings of the General Conference are prepared in English as well as French. Please note, however, that the official version, particularly of the Resolutions voted by the Conference, is the French one.

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

Conception graphique :
Monika Jost

Imprimé par : Stedi, Paris

ISSN 1016-5893
ISBN 92-822-2175-X

Table des matières

Liste des délégués et des invités 9

Comptes rendus des séances, 11-15 octobre 1999 17

Ordre du jour 18

- 1 Ouverture de la Conférence 19
- 2 Présentation des titres accréditant les délégués 21
- 3 Nomination du secrétaire de la Conférence 21
- 4 Établissement de la liste des délégués ayant pouvoir de voter 21
- 5 Approbation de l'ordre du jour 23
- 6 Rapport de M. le président du Comité international sur les travaux accomplis depuis la 20^e Conférence générale 23
 - 6.1 Les Comités consultatifs 28
 - 6.2 Le Comité international 35
 - 6.3 Le BIPM 38
- 7 Rapport du Comité international sur les besoins nationaux et internationaux dans le domaine de la métrologie 54
- 8 Traçabilité des étalons de mesure au niveau mondial 57
- 9 Admission d'Associés à la Conférence générale 59
- 10 Relations avec l'Organisation internationale de métrologie légale 62
- 11 Rapports des présidents des Comités consultatifs 65
 - 11.1 Comité consultatif des longueurs 65
 - 11.2 Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées 69
 - 11.3 Comité consultatif du temps et des fréquences 76
 - 11.4 Comité consultatif d'électricité et magnétisme 87
 - 11.5 Comité consultatif de thermométrie 93
 - 11.6 Comité consultatif de photométrie et radiométrie 97
 - 11.7 Comité consultatif des rayonnements ionisants 102
 - 11.8 Comité consultatif pour la quantité de matière 108
 - 11.9 Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations 116
 - 11.10 Comité consultatif des unités 118
- 12 Programme de travaux futurs au BIPM 122

- 13 Dotation annuelle du BIPM **122**
 - 13.1 Rapport sur la réunion du Groupe de travail sur la dotation **122**
 - 13.2 Projet de résolution M **122**
 - 13.3 Mise à la disposition du BIPM de membres du personnel des laboratoires nationaux de métrologie **123**
 - 13.4 Projet de résolution C **123**
 - 13.5 Vote du projet de résolution M **123**
- 14 Propositions des délégués **124**
 - 14.1 Célébration du 125^e anniversaire de la Convention du Mètre **124**
 - 14.2 Création d'une journée internationale de la métrologie **125**
 - 14.3 Recherche de candidats pour remplacer M. T.J. Quinn au poste de directeur du BIPM, lors de son départ à la retraite à la fin de l'année 2003 **125**
- 15 Renouvellement par moitié du Comité international **126**
 - 15.1 Règles de la Convention du Mètre relatives à la composition du Comité international **126**
 - 15.2 La situation actuelle **126**
- 16 Vote des résolutions **128**
- 17 Questions diverses **129**
 - 17.1 Visite du Bureau international des poids et mesures **129**
 - 17.2 Visite du dépôt des prototypes métriques : Procès-verbal **129**
 - 17.3 Arrangement de reconnaissance mutuelle **130**
- 18 Clôture de la Conférence générale **130**

Résolutions adoptées par la 21^e Conférence générale 133

- Métrologie : besoins à long terme (Résolution 1) **135**
- Reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage et de mesurage émis par les laboratoires nationaux de métrologie (Résolution 2) **136**
- Associés à la Conférence générale des poids et mesures (Résolution 3) **137**
- Nécessité d'utiliser les unités du SI dans les recherches sur les ressources terrestres, l'environnement, la sécurité humaine et les études connexes (Résolution 4) **138**
- Révision de la mise en pratique de la définition du mètre (Résolution 5) **139**
- Besoins en métrologie dimensionnelle (Résolution 6) **141**
- La définition du kilogramme (Résolution 7) **141**
- Étalons primaires de fréquence opérationnels (Résolution 8) **142**

Extension de l'Échelle internationale de température au-dessous de 0,65 K
(Résolution 9) **143**

Métrologie en chimie (Résolution 10) **143**

Métrologie en biotechnologie (Résolution 11) **144**

Nom spécial donné à l'unité SI mole par seconde, le katal, pour exprimer
l'activité catalytique (Résolution 12) **145**

Dotation du BIPM (Résolution 13) **146**

Annexe A. Convocation de la 21^e Conférence générale des poids et mesures **147**

Annexe B. Programme de travail et budget du Bureau international des poids et mesures
pour les quatre années 2001 à 2004 **183**

Liste des sigles utilisés dans le présent volume 395

Liste des délégués et des invités à la 21^e Conférence générale des poids et mesures

Réunie à Paris en octobre 1999 sous la présidence de

M. Guy Ourisson

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

Président par délégation

M. Christian Bordé

Membre de l'Académie des sciences de l'Institut de France

Mesdames, Messieurs les délégués des États signataires de la Convention du Mètre. (Les noms des membres du Comité international des poids et mesures sont suivis d'un astérisque.)

Afrique du Sud

T. Demana, directeur, Standards and Environment, Department of Trade and Industry, Pretoria.

B.F. Denner, Manager, CSIR National Metrology Laboratory (CSIR-NML), Pretoria.

J.H. Maree, directeur, Material and Manufacturing Division, CSIR-NML, Pretoria.

Allemagne

E.O. Göbel*, président, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig.

H. Kunzmann, membre du conseil présidentiel, PTB, Braunschweig.

J.H. Gösele, conseiller scientifique, Ambassade de la République fédérale d'Allemagne, Paris.

Argentine

J. Valdés*, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Buenos Aires.

E.S. Kerner, directeur du département de métrologie légale, ministère de l'Industrie et du Commerce, Buenos Aires.

Australie

B.D. Inglis, directeur, National Measurement Laboratory (CSIRO), Lindfield.

W.R. Blevin*, secrétaire du CIPM, Cheltenham.

J. Birch, directeur, National Standards Commission, North Ryde.

Autriche

R. Dittler, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten (BMWA), ministère des Affaires économiques, Vienne.

A. Leitner, directeur du département métrologie, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), Vienne.

Belgique

H. Voorhof, conseiller général, Service de la métrologie, Bruxelles.

Brésil

M.A. Albuquerque de Araújo Lima, président, Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), Rio de Janeiro.

J.L. Vieira, conseiller aux affaires de coopération scientifique, technique et éducative, Ambassade du Brésil, Paris.

G. Moscati*, professeur, Instituto de Física, São Paulo.

Mme L. Contier de Freitas, chef de la division métrologie mécanique, INMETRO, Rio de Janeiro.

Bulgarie

T. Štrashimirov, directeur, Centre national de métrologie, Sofia.

Cameroun

Non représenté.

Canada

J. Luszyk, directeur général, Institut des étalons nationaux de mesure, Conseil national de recherches du Canada (NRC-CNRC), Ottawa.

A.R. Robertson, directeur, Étalons chimiques et mécaniques, NRC-CNRC, Ottawa.

R. VanKoughnett*, NRC-CNRC, Ottawa.

Chili

R. Nuñez-Brantes, chef de la division métrologie, Institut national de normalisation (INN), Santiago.

O. Alcaman, premier secrétaire chargé des affaires économiques et de la coopération, Ambassade du Chili, Paris.

Chine

Gao Jie*, directeur général adjoint, National Institute of Measurement and Testing Technology (NIMTT), Sichuan.

Corée (République de)

Myung Sai Chung*, président, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Taejon.

Chang-Suk Kim, KRISS, Taejon.

Corée (République populaire démocratique de)

Non représentée.

Danemark

K. Carneiro, directeur, Danish Institute of Fundamental Metrology (DFM), Lyngby.

P.C. Johansen, chef de la division métrologie, Danish Agency for Trade and Industry, Copenhague.

Dominicaine (République)

Non représentée.

Égypte (République arabe d')

Non représentée.

Espagne

Á. García San Román, directeur, Centro Español de Metrología (CEM), Madrid.

J. M. Balmisa, chef de la division électrique, CEM, Madrid.

États-Unis

Mme K.H. Brown, directeur adjoint, National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg.

J.M. Garner, International Relations Officer, Bureau of International Organizations Affairs, Washington DC.

B.S. Carpenter, directeur, International and Academic Affairs, NIST, Gaithersburg.

Mme K. Gebbie*, vice-présidente du CIPM, directeur, Physics Laboratory, NIST, Gaithersburg.

Finlande

Mme U. Lähteenmäki, directeur, Centre for Metrology and Accreditation (CMA), Helsinki.

A. Pusa, président, Conseil national de métrologie, Raute Precision Oy, Lahti.

O.V. Lounasmaa*, Helsinki University of Technology (HUT), Espoo.

France

A. Keller, directeur, Bureau national de métrologie (BNM), Paris.

Mme C. Serre, chargée de mission à la Direction des Nations unies et des Organisations internationales, ministère des Affaires étrangères, Paris.

C. Bordé, conseiller scientifique, BNM, Paris.

L. Énard, directeur, Bureau national de métrologie – Laboratoire central des industries électriques (BNM-LCIE), Fontenay-aux-Roses.

J. Kovalevsky*, membre de l'Institut, président du CIPM, président du BNM, Paris.

L. Hennekinne, secrétaire général, ministère des Affaires étrangères, Paris.

Hongrie

P. Pákay, président, National Office of Measures/Országos Mérésügyi Hivatal (OMH), Budapest.

P. Pataki, vice-président, OMH, Budapest.

Inde

A.K. Raychaudhuri, directeur, National Physical Laboratory of India (NPLI), New Delhi.

E.S.R. Gopal*, Emeritus scientist, NPLI, New Delhi.

Indonésie

Non représentée.

Iran (République islamique d')

Non représenté.

Irlande

Non représentée.

Israël

Non représenté.

Italie

P. Soardo, président du comité pour le système d'étalonnage, Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris (IEN), Turin.

R.F. Laitano, directeur, Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti (ENEA-INMRI), Rome.

G. Molinar, directeur, Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Metrologia G. Colonnetti (CNR-IMGC), Turin.

S. Leschiutta*, président, IEN, Turin.

Japon

H. Imai, directeur général, National Research Laboratory of Metrology (NRLM), Tsukuba.

K. Iizuka*, vice-président du CIPM, conseiller, Agency of Industrial Science and Technology (AIST), c/o NRLM, Tsukuba.

T. Yano, directeur adjoint de la Division infrastructure des techniques et des normes de mesures, AIST, Tokyo.

R. Ichikawa, conseiller chargé des affaires commerciales, Ambassade du Japon, Paris.

S. Itakura, premier secrétaire chargé des affaires scientifiques, Ambassade du Japon, Paris.

Mexique

H. Nava-Jaimes, directeur général, Centro Nacional de Metrología (CENAM), Quéretaro.

I. Castelazo Sinencio, directeur, Technology Services, CENAM, Quéretaro.

H. Rodríguez, premier secrétaire, Ambassade du Mexique, Paris.

Norvège

H. Kildal, directeur général, Norwegian Metrology and Accreditation Service, Justervesenet (JV), Kjeller.

Nouvelle-Zélande

C.M. Sutton, directeur, Measurement Standards Laboratory of New Zealand (MSL), Lower Hutt.

Pakistan

Non représenté.

Pays-Bas

T.M. Plantenga, directeur, NMI Van Swinden Laboratorium (NMI-VSL), AR Delft.

R. Kaarls*, AR Delft.

Mme J. Van Spronssen, ministère des Affaires économiques, La Haye.

Pologne

K.A. Mordziński, président, Central Office of Measures/Główny Urząd Miar (GUM), Varsovie.

Mme M. Klarner-Sniadowska, directeur, Bureau des affaires internationales (GUM), Varsovie.

Portugal

E.M. de Almeida Farinha, vice-président, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Monte da Caparica.

S. Dias Antunes, assesseur, IPQ, Monte da Caparica.

Roumanie

P. Darvariu, directeur général adjoint, Bureau roumain de la métrologie légale (BRML), Bucarest.

Royaume-Uni

S.I. Charik, directeur, Department of Trade and Industry, Londres.

A.J. Wallard*, directeur adjoint, National Physical Laboratory (NPL), Teddington.

I. Mills, président du Comité consultatif des unités, University of Reading.

Russie (Fédération de)

L.K. Issaev*, directeur adjoint, All-Russian Scientific and Research Institute for Metrological Service of Gosstandart of Russia (VNIIMS), Moscou.

V.N. Krutikov, vice-président, Gosstandart, Moscou.

N.I. Khanov, directeur, Institut de métrologie D.I. Mendéléev (VNIIM), Gosstandart, Saint-Pétersbourg.

A.I. Astashenkov, directeur, VNIIMS, Moscou.

B.I. Alshin, directeur, Institut des mesures physico-techniques et radiotechniques (VNIIFTRI), Gosstandart, Moscou.

V.S. Ivanov, directeur, Institut des mesures en optique physique (VNIIOFI), Gosstandart, Moscou.

Mme N.P. Mouravskaya, directeur adjoint, VNIIOFI, Moscou.

Singapour

Lam Kong Hong, directeur, Singapore Productivity and Standards Board (PSB), Singapour.

Lee Shih Mean, chef assistant, PSB, Singapour.

Slovaquie

P. Kneppo, directeur, Slovak Institute of Metrology/Slovenský Metrologický Ústav (SMU), Bratislava.

J. Skákala, expert, SMU, Bratislava.

Suède

H. Andersson, directeur, Swedish National Testing and Research Institute (SP), Borås.

Suisse

W. Schwitz, directeur, Office fédéral de métrologie (OFMET), Wabern.

Tchèque (République)

A. Šafarik-Pštroš, président, Czech Office for Standards, Metrology and Testing, Prague.

P. Klenovský, directeur, Institut de la métrologie tchèque (CMI), Prague.

V. Šindelár, président, Czech Metrology Society, Prague.

Thaïlande

P. Shiowattana, directeur, National Institute of Metrology of Thailand (NIMT), Bangkok.

Turquie

I. Çelik, directeur général, ministère de l'Industrie et du Commerce, Conseil d'administration des étalons de mesure, Ankara.

E. Gürlük, directeur de section, Conseil d'administration des étalons de mesure, ministère de l'Industrie et du Commerce, Ankara.

H. Ugur*, directeur, Tubitak Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), Gebze-Kocaeli.

Uruguay

A. Navarro, directeur général, ministère de l'Industrie, de l'Énergie et des Mines, Montevideo.

Venezuela

Non représenté.

Ont assisté à la Conférence

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

Les représentants de l'Organisation internationale de métrologie légale (OIML), Paris (G.J. Faber, président de l'OIML ; B. Athané, directeur du Bureau international de métrologie légale).

P. Giacomo, directeur honoraire, BIPM, Sèvres.

Le personnel scientifique du BIPM.

**Comptes rendus des séances
de la 21^e Conférence générale
des poids et mesures
11-15 octobre 1999**

Ordre du jour

L'ordre du jour provisoire de la 21^e Conférence générale (*voir* page 151) est adopté comme ordre du jour définitif.

1 Ouverture de la Conférence

M. Guy Ourisson, président de l'Académie des sciences de l'Institut de France, ouvre la séance inaugurale de la 21^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM) en prononçant l'allocution suivante :

« Monsieur le Secrétaire général,

Mesdames et Messieurs, mes chers collègues,

C'est un grand plaisir pour moi que d'avoir le privilège de vous accueillir pour la Conférence générale des poids et mesures. C'est un privilège que je dois uniquement au fait que je me trouve être le président en exercice de l'Académie des sciences de Paris au moment où vous vous réunissez, mais un privilège que je ne dois en rien à mon domaine de compétence scientifique : je ne suis que chimiste et, comme je vous le montrerai tout à l'heure, les chimistes courent aujourd'hui le risque d'être de bien modestes métrologues.

Mais tout d'abord je voudrais vous féliciter pour l'efficacité avec laquelle vous avez su monter un coup médiatique extraordinaire en faisant en sorte que, juste avant votre Conférence, le satellite qui s'apprêtait à explorer Mars s'écrase, par suite, dit-on, d'une mauvaise utilisation du Système international d'unités (SI). Même si la raison se révèle plus tard être différente, cela reste un coup médiatique exceptionnel que d'avoir pu faire écrire dans tous les journaux que si nos amis américains nous avaient écoutés et avaient adopté sans réserve le SI, cet incident grave par son coût, mais qui n'a pas fait de victime, ne se serait pas produit.

Je voudrais aussi vous remercier de m'avoir donné l'occasion d'aller rendre visite à M. Quinn dans son petit royaume du Pavillon de Breteuil. À l'école primaire, j'avais évidemment appris l'existence de ce lieu mythique, mais je n'imaginai pas un lieu de travail aussi intéressant et aussi beau. La discrétion nécessaire au travail des métrologues y est assurée, dans un cadre que nous sommes fiers d'avoir pu offrir à la communauté internationale. La République sait parfois se montrer intelligemment généreuse avec l'héritage de la Royauté.

Chimiste ayant reçu une formation à l'ancienne mode, je crois comprendre certaines de vos préoccupations. Bien sûr à un niveau élémentaire, j'ai appris à étalonner une balance d'analyse peu amortie, à mesurer des spectres optiques d'absorption avec un galvanomètre, à mesurer au micromètre la position de raies spectrales sur une plaque photographique, à mesurer la polarisation de la lumière avec un polarimètre optique, par approximations successives, à consulter un baromètre en évitant les erreurs de parallaxe, avant de mesurer un point d'ébullition, à mesurer des températures de fusion

avec correction de colonne émergente, etc. Je constate simplement que toutes ces opérations sont maintenant remplacées par la lecture d'un résultat numérique sur un affichage par diodes ou par cristaux liquides. Que la balance soit sale ou dérégulée, l'électronique défaillante, les conditions de travail désastreuses ou non, un résultat s'affiche toujours, et il est lu et retranscrit quand il n'est pas simplement enregistré et inséré dans un manuscrit d'article, avec autant de chiffres qu'il y a de places sur l'affichage. En tant que rédacteur de revues primaires de chimie, j'ai constamment à lutter contre la parution de résultats stupides, notamment quand des collègues pourtant éminents rapportent des pouvoirs rotatoires avec deux décimales, voire trois, pour des solutions si diluées que même l'unité n'est pas significative. Bref, loin de ce dont vous aurez à discuter et à décider dans les jours qui viennent, et même dans des disciplines dans lesquelles les mesures sont essentielles, elles sont souvent d'une qualité qui vous affligerait, si vous le saviez. Sans compter l'invasion de données non métriques comme les psi pour les pressions, simplement parce que les manomètres industriels sont en partie fabriqués aux États-Unis. Vous ne devez donc pas seulement vous préoccuper de vos définitions, mais aussi nous donner des arguments pour assainir l'utilisation des mesures par les praticiens, malgré leur simplification qui nous facilite tellement la pratique quotidienne au laboratoire.

J'espère que le cadre du Collège de France dans lequel vous serez reçus pendant votre bref séjour à Paris vous permettra de réaliser le travail important qui est à votre programme, et vous souhaite une Conférence féconde et harmonieuse. »

M. Kovalevsky, président du Comité international des poids et mesures (CIPM), se joint à M. Ourisson pour remercier l'administrateur du Collège de France d'avoir eu l'obligeance d'offrir ses locaux au Comité international et à la Conférence générale ; il remercie aussi le ministère français des Affaires étrangères pour la traduction simultanée pendant la Conférence. Il remercie ensuite le ministère français des Affaires étrangères et l'ambassade d'Italie à Paris pour les réceptions qu'ils offrent aux délégués. C'est aussi l'occasion pour lui de témoigner sa reconnaissance aux ambassades du Canada, d'Italie et de Grande-Bretagne au sujet du courrier qu'elles ont adressé au ministère des Affaires étrangères de France pour appuyer la demande de permis de construire d'un nouveau bâtiment sur le site du Bureau international des poids et mesures (BIPM) et de remercier le ministère des Affaires étrangères pour avoir facilité l'approbation du projet.

M. Ourisson informe ensuite les délégués qu'il est retenu par d'autres obligations et est obligé de quitter la Conférence générale, mais que M. Christian Bordé, physicien, conseiller scientifique du Bureau national de métrologie et membre de l'Académie des sciences de Paris, le remplacera pour la suite de la Conférence.

2 Présentation des titres accréditant les délégués

Il est demandé dans la Convocation que la composition de chaque délégation soit communiquée au Bureau international au plus tard deux semaines avant l'ouverture de la Conférence. À leur arrivée, Mesdames et Messieurs les délégués sont priés de présenter les titres d'accréditation remis par les autorités concernées de leur Gouvernement.

3 Nomination du secrétaire de la Conférence

M. Bordé, devenu président de la Conférence, propose que M. W.R. Blevin, secrétaire du Comité international, soit nommé secrétaire de la Conférence. Sa proposition est approuvée.

4 Établissement de la liste des délégués ayant pouvoir de voter

Le secrétaire, après avoir examiné les titres accréditant les délégués, procède à l'établissement de la liste, par État, des délégués chargés du vote, au nom de leur Gouvernement. Cette liste, par ordre alphabétique, s'établit comme suit :

Afrique du Sud	T. Demana
Allemagne	E.O. Göbel
Argentine	J. Valdés
Australie	B. Inglis

Autriche	R. Dittler
Belgique	M. Vorhoof
Brésil	M.A. Albuquerque de Araújo Lima
Bulgarie	T. Štrashimirov
Canada	J. Lusztyk
Chili	R. Nuñez-Brantes
Chine	Gao Jie
Corée (République de)	Myung Sai Chung
Danemark	K. Carneiro
Espagne	Á. García San Román
États-Unis	K.H. Brown
Finlande	U. Lähteenmäki
France	A. Keller
Hongrie	P. Pataki
Inde	A.K. Raychaudhuri
Italie	P. Soardo
Japon	H. Imai
Mexique	H. Nava-Jaimes
Norvège	H. Kildal
Nouvelle-Zélande	C.M. Sutton
Pays-Bas	T.M. Plantenga
Pologne	K.A. Mordziński
Portugal	E.M. de Almeida Farinha
République tchèque	A. Šafařík-Pštroš
Roumanie	P. Darvariu
Royaume-Uni	S.I. Charik
Russie (Fédération de)	L.K. Issaev
Singapour	Lam Kong Hong
Slovaquie	P. Kneppo
Suède	H. Andersson
Suisse	W. Schwitz
Thaïlande	P. Shiowattana
Turquie	I. Çelik
Uruguay	A. Navarro

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

5 Approbation de l'ordre du jour

L'ordre du jour provisoire proposé dans la Convocation est adopté (*voir* page 151). M. Blevin annonce que le projet de résolution N sur le katal sera discuté après le rapport de M. Kaarls, président du Comité consultatif sur la quantité de matière (CCQM), et qu'un Groupe de travail sur la dotation du BIPM sera créé à l'issue de la discussion sur le point 7 de l'ordre du jour afin de considérer le projet de résolution M.

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

6 Rapport de M. le président du Comité international sur les travaux accomplis depuis la 20^e Conférence générale (octobre 1995 – septembre 1999)

M. J. Kovalevsky, président du Comité international, présente le rapport suivant.

« En conformité avec les articles 7 et 19 du Règlement annexé à la Convention du Mètre, j'ai le plaisir en tant que président du Comité international de présenter mon rapport sur les travaux accomplis depuis la 20^e Conférence générale qui s'est tenue au mois d'octobre 1995.

Il y a près de cent vingt-cinq ans que la Convention du Mètre a été signée à Paris par les délégués de dix-sept nations. Quarante-huit nations adhèrent maintenant à ce traité, qui réunit toutes les nations industrialisées du monde. Dans son rapport à la 20^e Conférence générale, mon prédécesseur, le professeur Dieter Kind, a retracé le développement de la métrologie internationale de 1875 à 1995. Il a montré combien le besoin d'une métrologie internationale s'est accru et a souligné le développement des activités menées sous l'égide de la Convention du Mètre. Ces activités ne concernent pas seulement le BIPM et son programme de travail, mais également les laboratoires nationaux de métrologie (LNM) qui établissent les fondements nécessaires aux mesures exactes et fiables dans le monde entier. La 20^e Conférence générale s'est poursuivie par la discussion et l'adoption de onze résolutions. Trois

d'entre elles ont incité le Comité international et le BIPM à mener, depuis 1995, des travaux importants qui figurent à l'ordre du jour de la présente Conférence. Il s'agit de la Résolution 2 (1995) sur la traçabilité des étalons au niveau mondial, de la Résolution 7 (1995) sur la métrologie en chimie et de la Résolution 11 (1995) sur les besoins à long terme dans le domaine de la métrologie. De plus, la Résolution 10 (1995) demande au président du Comité international de présenter un rapport à la présente Conférence sur les discussions avec le président de l'Organisation internationale de métrologie légale (OIML).

Dans la Résolution 11 (1995), la 20^e Conférence générale avait demandé au Comité international :

« d'étudier les besoins nationaux et internationaux à long terme relatifs à la métrologie, les nécessaires collaborations internationales et le rôle primordial du BIPM pour faire face à ces besoins, les engagements financiers ou autres qui seront demandés aux États membres au cours des décennies à venir, et d'en rendre compte ».

En réponse à cette Résolution, le Comité international a demandé à l'un de ses membres, Monsieur W.R. Blevin, de préparer un projet de rapport. Après de nombreuses consultations, une première version a été présentée au Comité international en septembre 1996, et une nouvelle version en septembre 1997. Le texte définitif, adopté par le Comité international à la fin de l'année 1997, a été publié par le BIPM et envoyé aux États membres en août 1998. Le titre complet est le suivant : *Besoins nationaux et internationaux dans le domaine de la métrologie : les collaborations internationales et le rôle du BIPM. Rapport préparé par le CIPM pour les Gouvernements des États membres de la Convention du Mètre.*

Incontestablement cette description des activités internationales de la métrologie a une portée dépassant de loin ce qui a jamais été écrit et ce rapport est d'une importance capitale pour l'avenir de la Convention du Mètre. Il sera présenté et commenté par le secrétaire du Comité international au point 7 de l'ordre du jour. Plusieurs de ses conclusions ont déjà abouti à des décisions et à des actions prises par le Comité international ou le BIPM, et les autres sont présentées à cette Conférence générale comme projets de résolutions.

L'une des conclusions de ce rapport est que le Comité international doit avoir des contacts beaucoup plus étroits avec les laboratoires nationaux de métrologie et avec les organisations régionales de métrologie. Ceci l'a amené à mettre en place des réunions avec les directeurs des laboratoires nationaux de métrologie des États membres de la Convention du Mètre. Deux de ces réunions ont été organisées par le BIPM et se sont déroulées à Sèvres : la première en février 1997 et la deuxième en février 1998. La troisième se déroulera jeudi au cours de la présente Conférence générale. Le succès de ces réunions a clairement démontré le besoin de rencontrer les directeurs en dehors du caractère formel d'une Conférence générale pour débattre de sujets d'intérêt commun aux membres du Comité international, aux directeurs des

laboratoires nationaux et aux responsables du BIPM. Ces réunions se poursuivront à l'avenir. C'est lors de ces deux réunions des directeurs que furent discutées les versions successives d'un projet d'accord sur la « Reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage et de mesurage émis par les laboratoires nationaux de métrologie » que je mentionnerai ici sous l'abréviation MRA.

En 1996, il devenait évident qu'un besoin croissant existait d'un accord, sous quelque forme que ce soit, sur la reconnaissance des étalons nationaux de mesure. Ceci était sous-jacent, mais non formulé explicitement, dans la Résolution 2 (1995) de la 20^e Conférence générale sur la traçabilité des étalons au niveau mondial. La nécessité d'établir un accord en métrologie résulte du besoin de fournir un fondement métrologique solide au nombre croissant d'accords de reconnaissance mutuelle liés aux étalonnages, aux essais et à l'accréditation. Des discussions s'étaient déroulées lors de réunions des organisations régionales de métrologie sur la possibilité d'établir des accords régionaux qui seraient plus tard reliés entre eux. Lors de la réunion des directeurs de 1997, on a envisagé une solution plus efficace et de moindre coût, qui pourrait prendre la forme d'un accord mondial sous l'égide du Comité international. Les directeurs donnèrent un accord de principe, et d'intenses discussions furent menées au cours de l'année suivante. Les directeurs des laboratoires nationaux de métrologie de trente-neuf États membres ont par la suite paraphé le projet d'accord qui a résulté de la réunion de 1998 et qui constitue la base du texte soumis à signature jeudi 14 octobre 1999. Pour des raisons légales, liées au statut formel des accords internationaux, nous avons maintenant dénommé notre document « arrangement » plutôt qu'« accord », afin qu'il soit clairement dit que ce n'est pas un document ayant force de loi. Techniquement, il repose sur un ensemble de comparaisons clés des étalons nationaux de mesure, exécutées sous les auspices des Comités consultatifs, des organisations régionales de métrologie et du BIPM. Plus de soixante-dix comparaisons clés sont actuellement en cours ; la liste complète, qui comprend les détails des grandeurs, des domaines de mesure, des dates de début et de fin des comparaisons, des laboratoires pilotes et des participants, est disponible sur le site Internet du BIPM (www.bipm.org). Lors des sessions des six Comités consultatifs qui ont eu lieu cette année, les progrès des comparaisons clés, le calcul des valeurs de référence des comparaisons clés et des degrés d'équivalence ont fourni la plupart des sujets de discussion. Un effort considérable a été accompli pour préparer un document donnant des directives pour les comparaisons clés et intitulé « Directives pour les comparaisons clés du CIPM ». Toutes les comparaisons clés du Comité international utilisent ces directives ou des documents similaires, qui les suivent de très près ; ces directives sont maintenant aussi adoptées par les organisations régionales de métrologie pour leurs propres comparaisons clés. Il est important que l'incertitude de chaque mesure soit estimée de façon comparable, ceci afin de lier de manière quantitative les résultats des compa-

raisons clés menées par les Comités consultatifs à ceux des comparaisons clés menées par les organisations régionales de métrologie. L'importance d'une estimation correcte des incertitudes est soulignée dans le document de directives, où il est en particulier énoncé qu'une mesure ne sera pas incluse dans les résultats d'une comparaison clé si elle n'est pas accompagnée d'un bilan d'incertitude complet. L'une des conséquences les plus significatives du programme de comparaisons clés est que, plus que par le passé, on demande davantage de rigueur aux LNM dans l'évaluation et la déclaration de leurs incertitudes. Ceci est déjà un résultat tout à fait positif.

En février 1999 s'est tenue à Sèvres une réunion de discussion sur les comparaisons clés, à laquelle ont participé quelque quatre-vingts représentants des laboratoires nationaux membres de Comités consultatifs. Le but de la réunion, qui a été atteint avec succès, était d'examiner en détail comment appliquer les directives dans le contexte du MRA.

La présentation finale des résultats des comparaisons clés et des possibilités en matière de mesures et d'étalonnages des LNM se fera au moyen d'une base de données, désignée base de données du BIPM sur les comparaisons clés, qui sera gérée par le BIPM. La conception et la mise en œuvre de la base de données sont entreprises par le National Institute of Standards and Technology (NIST) en étroite collaboration avec le BIPM et devraient être achevées pour le mois de novembre 1999.

Pour chaque participant, le résultat de ces comparaisons se présente sous forme d'un « degré d'équivalence » donnant la différence avec la valeur de référence et l'incertitude associée. Il est inscrit dans une liste appelée annexe B du MRA.

Parallèlement à l'exécution des comparaisons clés par les Comités consultatifs, les organisations régionales de métrologie et le BIPM, une tâche importante est la mise en évidence et l'analyse des possibilités en matière de mesures et d'étalonnages des LNM, afin d'intégrer cette information dans l'annexe C du MRA. Ce travail est coordonné par un nouveau comité mis en place par le Comité international dans le contexte du MRA, et connu sous le nom de Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM. Ce comité joue un rôle fondamental dans le fonctionnement de l'arrangement ; il s'est réuni déjà trois fois, en particulier tout récemment, en juillet 1999. Les responsabilités des organisations régionales de métrologie évoquées dans le MRA ont amené chacune d'entre elles à mettre en place des structures au sein de sa propre organisation, pour s'occuper de la réalisation des comparaisons clés et de l'évaluation des possibilités en matière de mesures et d'étalonnages de ses laboratoires membres qui figureront dans l'annexe C du MRA. Les organisations régionales de métrologie ont accepté ces nouvelles responsabilités et, pour preuve, nous avons assisté à la formation d'une nouvelle organisation, la Middle East Metrology Organization (MENAMET) au Moyen-Orient, et à un regain d'activité au sein du Sistema Interamericano de Metrologia (SIM) pour les pays du

continent américain, et de la Southern African Development Community Cooperation in Measurement Traceability (SADCMET), pour les pays d'Afrique du Sud. L'obligation stipulée dans le MRA d'établir des systèmes d'assurance de qualité au sein des LNM a suscité de nombreuses discussions qui témoignent d'un changement important de l'attitude de nombreux laboratoires pour ce qui est de leur indépendance et de leurs prérogatives. Par exemple, un LNM ne peut plus affirmer que ses mesures sont par définition correctes, du fait de sa position d'institut responsable des étalons nationaux. La mise en place de systèmes d'assurance de qualité dans tant de groupes industriels et gouvernementaux a contraint la plupart des laboratoires nationaux de métrologie à faire de même. L'expérience de ceux qui l'ont déjà réalisé est que, malgré le coût initial élevé de la mise en place d'un tel système, le bénéfice en matière de confiance accordée aux travaux du laboratoire est évident. En résumé, il est clair que le MRA aura un impact considérable sur les travaux des LNM et une importance considérable pour la métrologie internationale. Il fournira un fondement métrologique solide à de nombreux accords plus étendus liés au commerce et aux réglementations et démontrera que les LNM remplissent le rôle qui leur a été assigné par leur Gouvernement. Il montrera aussi, clairement et publiquement, que l'ensemble des LNM constitue la solution la plus rentable pour garantir des mesures fiables au niveau international.

Il est apparu, à l'occasion de la mise au point du MRA, qu'il faut trouver un moyen de raccorder au SI les activités métrologiques d'un nombre d'États beaucoup plus grand que celui des États actuellement membres de la Convention du Mètre. Nous ne pouvons ignorer que le commerce international exige la traçabilité des mesures au SI pour tous les échanges commerciaux entre les nations. Nous devons cependant accepter qu'il existe de nombreux États plus petits ou moins influents qui trouveraient difficile d'acquitter la redevance annuelle, même minimale, d'un État membre de la Convention du Mètre (0,5 % de la dotation du BIPM). Le Comité international estime que la Conférence générale devrait assumer la responsabilité de mettre en œuvre un mécanisme pour établir des liens au SI de tous les systèmes de mesure de tous les États et entités économiques, y compris ceux qui ne sont pas membres de la Convention du Mètre. La participation au MRA par le biais d'organisations régionales de métrologie semble être un moyen d'y parvenir. Il est cependant nécessaire d'établir un lien formel au BIPM, et d'apporter une contribution financière pour couvrir les frais. La Convention du Mètre ne prévoit pas une catégorie d'Associés mais, par analogie avec la Convention de l'OIML, le Comité international propose à la 21^e Conférence générale de créer une catégorie d'Associés à la Conférence générale. Les États ou entités économiques associés auraient le droit de participer au MRA selon des modalités à préciser. Cette proposition, qui a le soutien du Gouvernement français dépositaire de la Convention du Mètre, est traitée dans le projet de résolution C qui sera proposé à la discussion au point 9 de l'ordre du jour.

Dans sa Résolution 10 (1995), la 20^e Conférence générale invitait le président du Comité international, conjointement avec le président de l'OIML, à étudier les moyens d'améliorer la coopération et l'efficacité dans la réalisation de leurs objectifs et dans l'utilisation des ressources de leurs deux organisations. Un groupe de travail commun s'est réuni plusieurs fois et des représentants de l'International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) l'ont rejoint par la suite. Un rapport sur cette activité sera présenté au point 10 de l'ordre du jour.

6.1 Les Comités consultatifs

Une des recommandations du rapport sur les besoins à long terme relatifs à la métrologie est que l'activité des Comités consultatifs doit s'étendre à tous les domaines de la métrologie où une coordination internationale est nécessaire et n'est pas déjà du ressort d'une autre instance. Le Comité international a identifié trois nouveaux domaines dans lesquels un tel besoin existe : l'acoustique, les ultrasons et les vibrations constituent le premier ; la dureté le deuxième ; le débit de fluides, comprenant la viscosité, le troisième. Le besoin de coordination internationale des étalons de mesure pour le premier d'entre eux s'est révélé suffisamment urgent et important pour que le Comité international crée un nouveau Comité consultatif en ce domaine, le Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations (CCAUV). Pour la dureté, le débit de fluides et la viscosité, le Comité international a créé des groupes de travail au sein d'un Comité consultatif existant, le Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM). Lors de l'étude sur les besoins à long terme relatifs à la métrologie, le Comité international s'est rendu compte que les appellations traditionnellement données à certains de ses Comités consultatifs reflétaient mal l'étendue de leur travail. Ceci tendait à renforcer un dangereux malentendu qui circulait dans certains milieux, selon lequel le travail du BIPM était étroit, purement scientifique et avait peu de rapports avec les besoins pratiques de la métrologie. Par exemple, le nom traditionnellement donné au Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM) ne reflétait pas les activités plus étendues de ce Comité en matière de mesures de longueur et de métrologie dimensionnelle. C'est pour cette raison que le Comité international, en septembre 1997, a modifié les appellations (et les sigles) de quatre de ses Comités consultatifs. Outre le CCDM, qui est devenu le Comité consultatif des longueurs (CCL), le Comité consultatif d'électricité (CCE) est devenu le Comité consultatif d'électricité et magnétisme (CCEM), le Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS) est devenu le Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF), et le Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants (CCEMRI) est devenu le Comité consultatif des rayonnements ionisants (CCRI).

La composition des Comités consultatifs a été examinée par le Comité international lors de ses réunions de 1996 et 1997. En 1996, le Comité international a énoncé ce qui suit à propos des critères pour en désigner les membres :

« La composition des Comités consultatifs est décidée par le Comité international en consultation avec les présidents des Comités consultatifs et le directeur du BIPM. Les laboratoires invités à être membres d'un Comité consultatif doivent être reconnus comme étant les plus compétents au niveau international dans le domaine couvert par ce Comité. Cela implique normalement :

- que ce soient des laboratoires nationaux chargés d'établir les étalons nationaux dans ce domaine ;
- qu'ils soient actifs dans le domaine de la recherche et aient publié dans des journaux de recherche de réputation internationale ;
- que leur compétence ait été démontrée par leur participation à des comparaisons internationales organisées par le Comité consultatif, le BIPM ou une organisation régionale de métrologie.

En plus des laboratoires membres, les Comités consultatifs peuvent avoir pour membres :

- des personnes nominativement désignées dont les connaissances et la compétence dans le domaine sont telles qu'elles peuvent apporter une aide précieuse au Comité consultatif, même si elles viennent d'un laboratoire qui ne répond pas aux critères pour être membre du Comité ;
- des unions internationales ou d'autres organisations internationales dont l'avis ou les compétences peuvent être utiles au Comité consultatif.

Les présidents des Comités consultatifs peuvent de temps à autre inviter des observateurs à assister aux sessions, y compris des laboratoires qui pourraient répondre aux critères mais qui ne sont pas encore membres.

En général, le laboratoire national de métrologie de chaque État membre de la Convention du Mètre qui le souhaite peut être membre ou observateur d'au moins un Comité consultatif. »

L'expérience depuis 1996 a montré que les comparaisons clés et la perspective du MRA ont augmenté de manière très significative l'intérêt pour les activités des Comités consultatifs et que de plus en plus de LNM demandent à en être membre à part entière ou à titre d'observateur. Le Comité international se réjouit de cette évolution qui élargit la base des activités menées sous l'égide de la Convention du Mètre. La création de la catégorie de membre observateur a été particulièrement bien accueillie par les LNM des États où l'activité en métrologie est moins développée.

Depuis 1995, dix-neuf sessions de Comités consultatifs ont été tenues, soit pratiquement le double du nombre de sessions ayant eu lieu pendant la précédente période de quatre ans. Ceci reflète l'accroissement de l'activité des Comités consultatifs, due en grande partie aux comparaisons clés. Les membres ont aussi ressenti le besoin de réunir les Comités consultatifs plus fréquemment afin de s'adapter au besoin croissant de l'activité internationale dans le domaine de la métrologie, besoin qui est la force motrice sous-jacente au MRA.

J'en arrive maintenant à des résumés succincts du travail de chaque Comité consultatif, résumés qui seront développés plus avant dans le déroulement de l'ordre du jour, par le président de chaque Comité.

Le CCDM, renommé CCL, s'est réuni en 1997 et a proposé une révision de la mise en pratique de la définition du mètre. Cette proposition a reçu l'accord du Comité international et est l'objet du projet de résolution E (*voir* page 166). L'importance de la métrologie dimensionnelle pour l'industrie à haute technologie a incité le CCL à entreprendre, dans ce domaine, un programme beaucoup plus vaste que par le passé. Le Groupe de travail du CCL sur la métrologie dimensionnelle est maintenant très actif et un certain nombre de comparaisons clés sont en cours. Le projet de résolution F (*voir* page 167) traite de la métrologie dimensionnelle.

Le CCM s'est réuni en 1996 et à nouveau en 1999. Le CCM, avec ses groupes de travail dans les secteurs des étalons de masse, de la force et de la pression, couvre un très vaste domaine de la métrologie, domaine qui englobe presque tout ce qui relève des applications de l'industrie. Une activité particulièrement réussie menée par les groupes de travail sur la pression consiste à tenir régulièrement des conférences internationales sur la métrologie des pressions à une date proche de celle de la session du CCM. Depuis de nombreuses années, le Groupe de travail du CCM sur la force mène à bien des comparaisons considérées comme « clés » pour ce domaine, si bien que la transition vers le nouveau régime des comparaisons clés a été beaucoup facilitée. En plus des groupes de travail permanents, un groupe de travail du CCM sur la constante d'Avogadro a été formé à la demande d'un certain nombre de LNM ; ceux-ci collaborent à un projet international visant à déterminer la constante d'Avogadro à l'aide de méthodes fondées sur les propriétés du silicium monocristallin. Ces études pourraient éventuellement aboutir à une nouvelle définition du kilogramme et sont l'objet du projet de résolution G (*voir* page 168). Afin d'étendre l'unification mondiale et la coordination des mesures à des domaines qui ne font pas encore partie des secteurs d'activité du BIPM, le Comité international a créé en 1998 deux nouveaux groupes de travail sous les auspices du CCM. L'un est le Groupe de travail *ad hoc* sur la dureté, dont l'International Measurement Confederation (IMEKO), l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et l'OIML sont membres. Il a pour objectif d'unifier les échelles de dureté utilisées à l'heure actuelle. L'autre groupe de travail traite du débit de

fluides et de la viscosité : il s'est réuni pour la première fois en juillet cette année et a rassemblé de nombreux représentants des LNM déjà engagés dans cette voie.

Le CCDS, renommé CCTF, s'est réuni en 1996 et en 1999. Le travail du CCTF, et celui du BIPM en matière de temps et fréquences, est fortement influencé par les percées rapides de la physique, en particulier de la spectroscopie atomique. Des avancées récentes dans notre capacité à interroger les atomes froids et les ions piégés font que l'exactitude des nouveaux étalons primaires de fréquence correspond à des incertitudes d'au moins un, ou peut être de deux, ordre(s) de grandeur plus faible(s) que celles des étalons à césium classiques. Le projet de résolution H (*voir* page 169) traite de ce point. Ces étalons ne sont pas encore en service, mais il est clair que certains d'entre eux le seront, sous peu, dans plusieurs endroits du monde. Jusqu'à cette année, les comparaisons régulières qui fournissent au BIPM les données pour le calcul du Temps atomique international (TAI) présentaient une exactitude suffisante et on pensait ne pas avoir besoin de comparaisons clés. Cependant, en 1999 le CCTF a considéré que la mise au point de ces nouveaux étalons de fréquence, de très haute exactitude, nécessite de les comparer directement les uns aux autres. Il a donc proposé de commencer une série de comparaisons clés d'étalons primaires de fréquence. Ceci soulève le problème de trouver des méthodes adéquates pour les comparer et aussi d'améliorer les liaisons horaires régulières qui fournissent les données pour le calcul du TAI. La demande croissante de résultats toujours plus exacts pour les mesures de temps reflète l'important investissement commercial qui existe déjà pour les systèmes de navigation. En plus du Global Positioning System (GPS) et du Global Navigation Satellite System (GLONASS), un certain nombre de nouveaux systèmes de satellites à couverture mondiale sont en préparation ; ils conduiront à l'adoption générale des systèmes globaux de navigation par satellite pour l'aviation civile. Tout cela demandera des échelles de temps atomiques des plus hautes exactitude et fiabilité. Lors de sa session de 1999, le CCTF a rédigé une lettre que le directeur du BIPM a envoyée aux organisations les plus importantes de navigation par satellite, attirant leur attention sur l'importance d'utiliser le TAI comme échelle de temps pour tous ces nouveaux systèmes. En 1998, un projet commun à l'IGS (Service international du GPS) et au BIPM a été instauré sur l'emploi du GPS pour des comparaisons précises d'horloges. Il s'agit d'utiliser les techniques mises au point pour la géodésie et fondées sur la mesure de la phase et du code des signaux émis par les satellites du GPS. C'est une initiative importante qui rassemble beaucoup de membres du CCTF. En 1997, un projet commun au BIPM et à l'Union astronomique internationale (UAI) a aussi été mis en place sur l'application de la relativité générale aux systèmes de référence spatio-temporels. Un nouveau Comité mixte BIPM/UAI a été créé ; il est issu du Groupe de travail du CCDS sur l'application de la relativité générale à la métrologie, dont le travail avait pris fin en 1997.

Le CCE, renommé CCEM, s'est réuni en 1997 et la prochaine session est prévue pour l'an 2000. Le domaine de l'électricité est l'un de ceux qui ont vu un changement radical des techniques employées, changement dû à l'introduction des étalons à effet quantique pour le volt et l'ohm en 1990. Depuis, le BIPM a réalisé beaucoup de comparaisons directes d'étalons nationaux du volt à effet Josephson et, plus récemment, d'étalons de résistance à effet Hall quantique. Ces comparaisons ont été réalisées en transportant les étalons du BIPM dans les LNM. De plus, le CCE a identifié une série de comparaisons clés, démarrées lors de la session de 1997, et qui devraient être terminées à temps pour la session du CCEM en l'an 2000. L'étendue du domaine couvert par les étalons électriques qui fonctionnent en courant continu et en courant alternatif, à basse et à haute fréquence, a toujours nécessité un grand nombre de comparaisons internationales. Ce fait se reflète dans le choix des comparaisons clés : environ une douzaine de comparaisons clés en courant continu et en courant alternatif à basse fréquence, et plutôt davantage en courant alternatif de haute fréquence. Ces dernières comparaisons clés sont organisées par le Groupe de travail du CCEM pour les grandeurs aux radiofréquences (GT-RF), qui existe depuis 1963. Le domaine de l'électricité et du magnétisme a une très grande importance industrielle et commerciale et le travail du CCEM consistant à conserver un réseau international exact et fiable de liens entre les LNM continuera d'être son but premier. Le Comité a créé un groupe de travail sur les comparaisons clés qui s'est réuni en juillet 1999 pour préparer la session du CCEM de l'an 2000. Il est à noter que la détermination de la constante d'Avogadro n'est pas la seule voie pouvant conduire à une nouvelle définition du kilogramme. Le CCEM dispose aussi d'un groupe de travail sur l'utilisation de mesures électriques pour contrôler la stabilité du prototype international du kilogramme ; l'une de ces mesures utilise la balance du watt qui compare une force électromagnétique à une force due à une masse pesante.

Le Comité consultatif de thermométrie (CCT) s'est réuni en 1996, et doit se réunir à nouveau en l'an 2000. Lors de la session de 1996, le Comité a sélectionné six comparaisons clés dans le but de les réaliser à temps pour la session suivante prévue alors en 1999. En fait, la session de 1999 a été reportée à l'an 2000, parce que les comparaisons n'étaient pas encore prêtes à être discutées dans une session plénière du CCT. En examinant les comparaisons passées qui pourraient être utilisées comme base provisoire d'équivalence, on a constaté que très peu de comparaisons avaient été effectuées depuis le milieu des années 1980, quand beaucoup de travail avait été réalisé pour préparer l'adoption de l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90). Ceci explique que la charge de travail liée aux comparaisons maintenant en cours est relativement importante. Le CCT travaille aussi à une extension de l'EIT-90 à des températures plus basses. La limite inférieure actuelle est de 0,6 K et doit être étendue à quelques millikelvins en utilisant la pression de fusion de l'hélium comme paramètre thermométrique. Le

projet de résolution I (*voir* page 171) traite de ce point. Un groupe de travail commun au CCT et au Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR) compare les méthodes de détermination des hautes températures fondées soit sur la thermométrie à rayonnement, méthodes définies dans l'EIT-90, soit sur la radiométrie spectrale absolue. Les méthodes radiométriques sont récentes et utilisent un radiomètre cryogénique comme référence. Également sous l'égide du CCT, il existe un groupe de travail sur les étalons d'humidité. Ce groupe de travail a été créé en 1994 et a commencé à réaliser des comparaisons pilotes afin de préparer le choix des comparaisons clés dans cet important domaine.

Le CCPR s'est réuni en 1997 et en 1999. Lors de la session de 1997 une série de six comparaisons clés a été identifiée et démarrée. Lors de la session de 1999 trois de ces comparaisons ont été présentées comme terminées et les résultats ont été approuvés par le Comité. Elles sont maintenant prêtes à être intégrées à l'annexe B du MRA et à la base de données du BIPM sur les comparaisons clés. L'analyse des résultats de la plupart des comparaisons clés du CCPR est particulièrement complexe car il s'agit de données spectrales qui couvrent une gamme étendue de longueurs d'ondes. Comme il n'est pas facile de déterminer un moyen simple d'exprimer les degrés d'équivalence, le Comité a choisi d'inclure les données individuelles obtenues pour chaque longueur d'onde. Il appartiendra à l'utilisateur de choisir la longueur d'onde ou la gamme de longueurs d'ondes qui lui est utile pour son application particulière. L'adoption presque universelle du radiomètre cryogénique par les LNM comme référence a considérablement amélioré l'exactitude et la cohérence des échelles nationales radiométriques. Il faut cependant améliorer les mesures dans le domaine de l'ultraviolet ; les comparaisons révèlent en effet des différences entre les échelles nationales beaucoup plus grandes dans ce domaine que dans les autres. Étant donné l'importance des mesures du rayonnement ultraviolet pour la santé et la sécurité humaines ainsi que pour certaines mesures liées à l'environnement, le CCPR a donné la priorité à ce domaine de longueurs d'ondes pour les travaux à venir.

Le CCEMRI, renommé CCRI, s'est réuni en 1996, en 1997 et en 1999. Le CCRI continue de travailler par le biais de ses trois sections, la Section I sur la dosimétrie des photons, la Section II sur les radionucléides et la Section III sur la dosimétrie des neutrons. Une grande partie des activités du CCRI a toujours consisté à effectuer des comparaisons internationales, devenues maintenant comparaisons clés. Au cours de ces dernières années, on a constaté un accroissement des besoins en matière de comparaisons en dosimétrie à des énergies toujours plus élevées, car les hôpitaux utilisent de plus en plus des accélérateurs pour fournir des rayonnements de photons à des fins thérapeutiques. Pour répondre à ce besoin, sans équiper le BIPM d'un accélérateur, ce qui n'est pas une proposition envisageable, le CCRI a conçu une méthode qui utilise une série de chambres d'ionisation fonctionnant aussi bien avec des photons de basse énergie qu'avec des

photons de haute énergie. Les comparaisons utilisant les premières de ces nouvelles chambres sont maintenant en cours. Le CCRI a décidé que l'équivalence internationale en matière de mesures de radionucléides peut être déduite des résultats du Système international de référence pour les radionucléides, le SIR, que le BIPM établit depuis 1975. Le SIR a été récemment étendu aux émetteurs de rayonnement β , que l'on mesure par la méthode du comptage par scintillation liquide.

Le Comité consultatif pour la quantité de matière (CCQM) s'est réuni chaque année depuis sa création en 1993 et a très rapidement fait une percée dans le vaste sujet de la métrologie en chimie. Il n'y a maintenant aucun doute que la communauté de la chimie analytique, qui naguère ne ressentait absolument pas le besoin de relier ses mesures au SI, est maintenant tout à fait consciente du problème et commence à s'intéresser au travail du CCQM et d'autres initiatives internationales similaires. L'étendue du travail réalisé sous les auspices du CCQM est en croissante augmentation. Lors de sa session de 1999, le Comité a identifié quelque seize comparaisons clés potentielles dont neuf sont maintenant en cours de réalisation. Les résultats de trois comparaisons clés ont été présentés et approuvés par le Comité en 1999 ; ils devraient bientôt être prêts à figurer à l'annexe B du MRA et dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés. J'attire votre attention sur le projet de résolution J (*voir* page 174) qui traite de la métrologie en chimie. La métrologie en biotechnologie, un domaine très proche de celui de la chimie analytique et qui peut en être considéré comme une extension, deviendra bientôt importante ; ceci est abordé dans le projet de résolution K (*voir* page 174).

Le nouveau CCAUV s'est réuni pour la première fois en 1999, faisant suite à une réunion préparatoire d'un groupe *ad hoc* en 1998. Le Comité international a décidé en 1998 de créer ce nouveau Comité consultatif après avoir pris en compte le rapport de son groupe de travail *ad hoc* et à la suite de demandes émanant de nombreux LNM d'une action internationale concertée dans le domaine de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations. Le groupe de travail lui-même avait défini un certain nombre de comparaisons internationales, identifiées provisoirement comme comparaisons clés, et en a démarré certaines. Ce nouveau Comité consultatif comprend des experts non seulement des LNM mais aussi de la Commission électrotechnique internationale (CEI) et de l'ISO, deux organisations qui ont dans le passé promu activement la coordination internationale dans ces domaines et qui ont poussé à la création de ce nouveau Comité consultatif. Les Comités consultatifs voient donc leur domaine d'activité s'élargir, comme il avait été pressenti dans le rapport sur les besoins à long terme, mentionné plus haut dans mon exposé.

Le Comité consultatif des unités (CCU) s'est réuni deux fois depuis la dernière Conférence générale, en 1996 et en 1998, et a approuvé la 7^e édition de la brochure sur le SI, qui a été publiée en 1998. Deux projets de résolu-

tions, issus du CCU, sont présentés à la présente Conférence générale, précisément le projet de résolution L sur le neper et le bel (*voir* page 176), et le projet de résolution N sur le nom spécial donné à l'unité dérivée du SI mole par seconde, le katal (*voir* page 177). Ce dernier projet a été élaboré en réponse à une demande de la Fédération internationale de chimie clinique et de médecine de laboratoire (IFCC). Le travail du CCU a une importance capitale pour le SI. Bien que le SI ait été principalement mis en œuvre entre les années 1960 et 1970, le besoin de le modifier ou de le mettre à jour se fait sentir de temps en temps. Les deux projets de résolutions présentés à cette Conférence générale en sont des exemples. Les discussions qui précèdent chaque proposition de changement du SI sont souvent complexes et subtiles. Il devient de plus en plus difficile de trouver des scientifiques très expérimentés qui soient qualifiés et intéressés à prendre part à ces discussions. L'attrait envers le SI n'est plus aussi fort pour les jeunes physiciens que lors de sa mise au point. Cependant, sans l'intérêt porté par de jeunes scientifiques, il est à craindre que des changements, dépourvus du fondement solide que seules l'expérience et la profonde compréhension des choses peuvent donner, risqueront d'être apportés au SI. Ceci demeurera un problème pour l'avenir, et je demande aux directeurs des LNM d'encourager leurs plus brillants jeunes scientifiques à réfléchir sur les unités. Il faut leur rappeler qu'une bonne compréhension des unités et des grandeurs physiques est un guide essentiel pour une pensée claire en physique.

6.2 Le Comité international

J'en arrive maintenant à la composition du Comité international. Lors de la réunion du Comité international qui s'est déroulée à l'issue de la dernière Conférence générale en octobre 1995, un nouveau bureau fut constitué et Luigi Crovini nommé secrétaire adjoint. Il était évident pour tout le monde que le poste important qu'est celui de secrétaire du Comité international lui reviendrait peu après. Il ne devait malheureusement pas en être ainsi, car quelques semaines après la 20^e Conférence générale, il mourut à l'âge peu avancé de cinquante-huit ans et le Comité international perdit en lui un de ses membres les plus respectés. Luigi Crovini était au moment de sa mort directeur de l'Istituto di Metrologia G. Colonnetti (IMGC) à Turin. Il était également président du CCT et avait pris au sein de ce Comité un rôle important dans la mise au point du texte de l'EIT-90. Afin d'honorer sa mémoire, ses collègues de la communauté de la thermométrie ont consacré un numéro spécial de *Metrologia* à la thermométrie (*Metrologia*, 1996, **33**, n° 4).

En octobre 1996, à l'annonce de la démission de Dieter Kind, qui était président depuis 1984 et membre du Comité international depuis 1976, j'ai été élu président, M. William Blevin, secrétaire, et Mme Katharine Gebbie et M. Kozo Iizuka, vice-présidents. Josef Skákala avait démissionné du poste

de vice-président en 1995 et du Comité international en 1996. Dieter Kind et Josef Skákala ont été tous les deux élus membres honoraires du Comité international. Messieurs Kai Siegbahn, Jacques Vanier, Yuri Tarbéev, Rafael Steinberg et Peter Clapham ont aussi démissionné du Comité international depuis la dernière Conférence générale. Monsieur Kai Siegbahn a été élu membre honoraire du Comité international.

Afin de combler les huit postes vacants, et conformément à l'article 14 (1875) du Règlement annexé à la Convention du Mètre, le Comité international a provisoirement élu M. Ernst Göbel, président de la Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB, Braunschweig, Allemagne), M. Sigfrido Leschiutta, président de l'Istituto Elettrotecnico Nazionale Gallileo Ferraris (IEN, Turin, Italie), M. Roy VanKoughnett, directeur général de l'Institut des étalons nationaux de mesure (INMS) du Conseil national de recherches du Canada (NRC, Ottawa, Canada), M. Lev Issaev, Gosstandart (Moscou, Fédération de Russie), M. Hüseyin Ugur, directeur de l'Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME, Gebze-Kocaeli, Turquie), M. Andrew Wallard, directeur adjoint du National Physical Laboratory (NPL, Teddington, Royaume-Uni), M. Chung Myung Sai, directeur du Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS, Taejon, République de Corée) et M. Joaquín Valdés de l'Instituto Nacional de Metrología Industrial (INTI, Buenos Aires, Argentine). Selon les articles 7 (1875) et 8 (1921) du Règlement annexé à la Convention du Mètre, ces élections provisoires doivent être soumises à la présente Conférence générale pour confirmation, avec un autre nom tiré au sort, pour que le nombre total des membres du Comité international soumis à élection ou réélection atteigne neuf. Ces élections font l'objet du point 15 de l'ordre du jour (*voir* page 126).

Le Comité international, lors de sa session de 1997, a examiné les critères pour être membre du Comité international. Certains articles du Règlement annexé à la Convention du Mètre en fixent les règles : la composition du Comité international, à l'article 8 du Règlement annexé à la Convention du Mètre (1921) ; les élections au Comité international à l'article 14 (1875) ; les élections au bureau du Comité, à l'article 9 (1921) ; la ratification par la Conférence générale des élections au Comité international, à l'article 7 (1875) ; les règles de fonctionnement du Comité international, aux articles 11 (1921), 12 (1921) et 13 (1875).

Pour résumer les critères pour être membre du Comité international, la Convention stipule que les dix-huit membres doivent être de nationalité différente ; lorsqu'un siège est vacant par suite du décès ou de la démission d'un membre du Comité, les membres restants sont appelés à élire par correspondance un nouveau membre. Cette élection doit être confirmée par un vote lors de la Conférence générale suivante.

En 1983, la 17^e Conférence générale a approuvé le rapport du groupe de travail établi par la 16^e Conférence générale en 1979 en vue d'examiner des propositions de révision de la Convention du Mètre. Une de ces propositions

consistait à augmenter le nombre de sièges au Comité international pour qu'il soit égal au nombre des États membres de la Convention, les membres étant alors délégués de leur Gouvernement. Le groupe de travail de la Conférence générale a recommandé de ne pas changer la composition du Comité international quant au nombre de sièges ou à l'indépendance des membres, qui sont élus à titre personnel et non comme délégués de leur Gouvernement. Le groupe a toutefois recommandé qu'avant l'élection, le Comité international s'assure que le candidat a l'approbation de son Gouvernement. Il est possible de se procurer une copie du rapport du groupe de travail de la 16^e Conférence générale auprès du BIPM. Ce rapport n'a jamais été publié *in extenso* mais il a été envoyé à l'époque aux Gouvernements des États membres.

En 1981 le Comité international a décidé que le curriculum vitae de toutes les personnes susceptibles d'être candidates à l'élection doit être présenté et discuté lors d'une réunion du Comité international. Dans le passé de telles discussions avaient parfois eu lieu par correspondance.

Les principes suivis à présent par le bureau et par le Comité international pour les élections sont les suivants :

- Les personnes candidates à l'élection sont dans tous les cas d'un rang élevé dans leur pays et ont une expérience qui les rend capables de participer aux travaux du Comité international.
- Il y a toujours un membre du Comité international de nationalité française, afin de reconnaître le rôle joué par la France à l'origine du système métrique et le fait que la France est dépositaire de la Convention du Mètre.
- Il y a toujours un membre de chacun des États dont la contribution est au maximum.
- Il y a généralement un membre de chacun des États dont la contribution est au moins égale à 2 %.
- En général, le Comité international s'efforce de maintenir un équilibre entre les différentes régions du monde et d'assurer la présence de quelques membres des États dont la contribution est au minimum.
- La candidature de personnes appartenant à des États membres qui n'auraient pas réglé leur contribution au BIPM depuis trois ans ou plus n'est pas envisagée.

Le Comité international estime que sa composition actuelle est en harmonie avec les principes énoncés ci-dessus. Ces principes sont accessibles au public sur le site Internet du BIPM et le Comité international encourage les candidats potentiels à se faire connaître à l'un des membres du Comité international (les adresses des membres du Comité sont disponibles sur le même site).

Depuis 1980 les membres se sont succédés rapidement. Aucun des membres actuels n'appartenait au Comité international en 1980, deux (le président et le secrétaire) étaient membres en 1985, trois (dont K. Iizuka, vice-président) étaient membres en 1990, quatre étaient membres en 1992, sept en 1993 et

comme nous l'avons vu, dix en 1995 lors de la dernière Conférence générale. Ainsi près de la moitié des membres a changé depuis 1995 et pratiquement la totalité depuis 1990. Le Comité international pense que la durée d'appartenance au Comité international des membres individuels devient trop courte et qu'il sera bientôt difficile de trouver des présidents de Comités consultatifs présents à plus de deux sessions de leur Comité, ce qui n'est pas souhaitable pour la bonne marche des Comités consultatifs. Si cette tendance d'appartenance de courte durée persiste, il deviendra difficile de trouver des membres du bureau du Comité international qui serviront suffisamment longtemps pour mener une politique suivie, situation qui pourrait conduire à de sérieuses difficultés.

Avant d'en arriver aux activités du BIPM, je me dois de signaler un événement important qui se produira d'ici quatre ans. À ce moment-là, le directeur actuel, M. T.J. Quinn, atteindra l'âge de la retraite ; le Comité international a décidé de lancer un appel à candidature et a défini un processus de sélection tel que le candidat retenu puisse se familiariser avec la fonction pendant au moins un an, de préférence deux ans avant de prendre le poste de directeur. L'annonce de vacance du poste a été arrêtée par le Comité international et le texte sera distribué au cours de la présente Conférence générale.

6.3 Le BIPM

Lors de chaque Conférence générale, on demande aux États membres d'examiner le travail accompli par le BIPM et le programme de travail à conduire pour la période suivante de quatre années, puis d'approuver un budget correspondant. Ceci concerne les points 12 et 13 de l'ordre du jour. Un examen très approfondi du travail et des perspectives de développement du BIPM est donné dans le rapport sur les besoins à long terme que j'ai déjà fréquemment évoqué dans mon rapport. Je donne ici un bref résumé du travail effectué dans les laboratoires du BIPM depuis la dernière Conférence générale, couvrant ainsi la période d'octobre 1995 à septembre 1999. Je vous rappelle que chaque année le directeur du BIPM prépare un rapport d'activité pour le Comité international, rapport publié dans les Procès-verbaux du CIPM et envoyé aux États membres. De plus, un rapport annuel officiel est envoyé aux Gouvernements des États membres au mois de mars de chaque année, exposant en détail la gestion financière et administrative du BIPM pour l'année précédente. Les résultats financiers sont audités et le rapport d'audit est présenté à la réunion annuelle du Comité international. Selon l'article 3 (1875) de la Convention du Mètre, le BIPM fonctionne sous la direction et la surveillance exclusives du Comité international, lui-même placé sous l'autorité de la Conférence générale qui est formée de délégués de tous les États membres. Le Comité international veille particulièrement à ce que les États membres soient complètement informés des décisions liées au BIPM, et de tout le travail qui y est accompli.

Depuis 1995, le travail du BIPM a été très influencé par la mise en place des comparaisons clés identifiées par les Comités consultatifs. Ceci a induit pour le BIPM sa participation directe à certaines d'entre elles, agissant en tant que laboratoire pilote pour quelques-unes et, pour celles dans lesquelles il n'est pas directement impliqué, assurant le secrétariat central lorsque c'est nécessaire. Chaque Comité consultatif dispose d'un secrétaire exécutif qui est l'un des responsables des sections scientifiques du BIPM. J'attire votre attention une fois encore sur le site Internet du BIPM (www.bipm.org) qui comprend une description détaillée des activités menées sous l'égide de la Convention du Mètre, c'est-à-dire de la Conférence générale, du Comité international, des Comités consultatifs et du BIPM, ainsi que le texte complet de la brochure sur le SI et l'accès aux numéros les plus récents de *Metrologia*. Le site Internet du BIPM comprend aussi un magasin électronique où il est possible d'acheter rapidement, par carte de crédit, toutes les publications du BIPM ainsi qu'un jeu de publications choisies de l'ISO et de l'Union internationale de chimie pure et appliquée (UICPA) qui traitent des grandeurs et des unités. En plus des publications officielles, le BIPM prépare depuis 1998 des bulletins d'information occasionnels, qui décrivent les travaux les plus récents des sections scientifiques du BIPM, et un bulletin plus général consacré aux activités du BIPM et du Comité international. Certaines publications du BIPM sont disponibles pour les délégués à la présente Conférence et je vous encourage à en prendre des exemplaires.

Le BIPM a, dans le passé, largement contribué à des publications de grand intérêt général comme le *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure* (GUM) et le *Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie* (VIM). Ces deux ouvrages ont été publiés par l'ISO pour le compte des sept organisations internationales responsables du texte, c'est-à-dire le BIPM, la CEI, l'IFCC, l'ISO, l'OIML, l'UICPA et l'Union internationale de physique pure et appliquée (UIPPA). À l'époque le travail avait été accompli au sein du groupe ISO/TAG 4. Les sept organisations se sont ensuite mises d'accord pour estimer qu'un groupe de travail indépendant, formé par les sept organisations, fournirait un meilleur forum de discussion pour réviser ces deux documents et, si nécessaire, en préparer de nouveaux. En conséquence, un nouveau groupe, le Comité commun pour les guides en métrologie, a été créé en 1997. Lors de sa première réunion deux groupes de travail ont été constitués, l'un pour la révision du GUM, l'autre pour la révision du VIM. Le travail a maintenant commencé au sein de ces deux groupes. Le premier président de ce Comité commun est le directeur du BIPM. Une autre activité importante du BIPM est l'édition et la publication du journal *Metrologia*, qui est la revue internationale de métrologie scientifique. Au cours des années 1995-1998, 4 volumes (soit environ 2500 pages) ont été publiés, comprenant des articles soumis à un comité de lecture et des résultats de comparaisons internationales.

Le travail scientifique du BIPM se répartit en trois catégories, toutes les trois essentielles : a) les étalonnages pour les LNM des États membres ; b) les

comparaisons internationales, et désormais les comparaisons clés ; et c) la recherche qui garantit le maintien des compétences scientifiques et professionnelles exigées par les premières catégories de travaux. Ce sont, bien sûr, ces recherches scientifiques qui confèrent au personnel du BIPM la compétence pour mener à bien son activité en tant que secrétaire scientifique des Comités consultatifs du Comité international. L'enjeu pour le directeur et le personnel scientifique de haut niveau du BIPM est d'identifier les axes de recherche qui peuvent être traités avec les ressources limitées dont ils disposent. Il faut remarquer que durant ces vingt dernières années le profil des recherches nécessaire aux activités a) et b) a profondément changé. La métrologie est maintenant beaucoup plus proche des frontières de la science qu'elle ne l'était naguère. Ceci signifie que la recherche en métrologie est elle-même à la pointe de la science et qu'elle nécessite par conséquent du personnel qualifié et compétent. En 1978, 17 % des membres du personnel étaient détenteurs d'un doctorat ou équivalent, alors qu'en 1999 cette proportion a atteint 34 %. Le nombre d'employés permanents du BIPM est passé de 65 au 1^{er} janvier 1995 à 62 au 1^{er} janvier 1999. Je vous renvoie au document « Programme de travail et budget du Bureau international des poids et mesures pour les quatre années 2001-2004 » pour des précisions quant à l'effectif et son évolution au cours des années (*voir* annexe B, pages 183-207). La réduction actuelle a été voulue afin de faire face au besoin de développer le travail scientifique du BIPM tout en gardant un budget pratiquement constant en valeur réelle. Seuls quelques changements d'orientation de faible ampleur ont été effectués en profitant du nombre relativement important de départs à la retraite qui se sont produits au cours de ces dernières années. Depuis le 1^{er} janvier 1996, il y a eu quinze départs en retraite (près du quart de l'effectif total) dont huit en 1998. Ceci a permis un renouvellement considérable du personnel et nous avons recruté d'excellents jeunes candidats. Parmi les vingt-neuf scientifiques qualifiés on relève onze nationalités différentes de toutes les parties du monde. Le programme présenté au point 12 est donc équilibré : il tient compte des besoins exprimés par les LNM, des qualifications du personnel, de nos équipements et des ressources financières disponibles. En 1998, le Comité international, suivant par-là une autre des recommandations du rapport sur les besoins à long terme, a décidé la mise en place au BIPM d'un petit programme de métrologie en chimie. Après en avoir discuté lors des sessions du CCQM et après avoir longuement consulté les laboratoires spécialisés, le directeur a proposé un programme de métrologie en chimie dans le domaine de l'analyse de mélanges de gaz. Ce programme nécessitera de recruter au total quatre personnes qualifiées, ce qui amènera l'effectif total permanent au niveau qui était celui de 1995. Ce programme doit démarrer en l'an 2000, après la remise en état d'une partie du bâtiment des rayonnements ionisants, rendue disponible à la suite du déménagement d'une partie de l'atelier de mécanique dans un nouveau bâtiment en cours de construction.

En 1983, le Comité international a proposé à la Conférence générale un plan à long terme de construction de nouveaux bâtiments au BIPM. Ce projet comprenait un bâtiment de laboratoires pour le travail sur les lasers, terminé en 1984, un bâtiment pour une bibliothèque et des bureaux, terminé en 1988, et un bâtiment pour l'atelier de mécanique. Cette ultime phase du programme est maintenant entamée : le nouveau bâtiment comprendra des bureaux, des salles de réunion et l'atelier de mécanique. L'achèvement des travaux de construction est prévu pour 2001 et le BIPM aura alors enfin un atelier moderne. Jusqu'à présent les lieux réservés aux activités de l'atelier étaient cause de souci pour le Comité international parce qu'ils étaient inconfortables et ne satisfaisaient pas aux normes actuelles de sécurité. L'installation d'un petit laboratoire de mesures en chimie sera possible dans l'espace libéré par le déplacement de l'atelier vers le nouveau bâtiment. À ce propos, je tiens ici à remercier publiquement les ambassades de plusieurs États membres, et le ministère des Affaires étrangères de France pour l'aide qu'ils ont apportée au BIPM afin que ce projet aboutisse dans des conditions satisfaisantes pour toutes les parties concernées.

Travaux du BIPM

Le point suivant, et aussi le dernier, est mon rapport sur les travaux accomplis dans les laboratoires du Bureau international pendant les quatre années d'octobre 1995 à septembre 1999, période vraiment très active et fructueuse.

Longueurs

1995/1996 : Deux lasers à argon asservis, en faisant appel l'un à la technique de la bande latérale en modulation de fréquence et l'autre à la technique du troisième harmonique, ont été comparés. La différence de fréquence mesurée était inférieure à l'incertitude de mesure. Ce résultat est important, car il montre que le fait d'utiliser une technique d'asservissement différente n'entraîne pas de décalage de fréquence significatif. Les premiers essais sur la radiation à $\lambda \approx 532$ nm, obtenue par doublement de fréquence du rayonnement émis par un laser à Nd:YAG, ont confirmé que celle-ci pourrait figurer à l'avenir dans la liste des radiations recommandées, et justifient la priorité donnée à ce travail cette année là. La technique de transfert de modulation a été essayée avec succès sur les lasers à He-Ne à $\lambda \approx 543$ nm ; ces lasers seront aussi comparés à d'autres lasers asservis à $\lambda \approx 543$ nm qui font appel à la technique habituelle du troisième harmonique. La collaboration continue avec l'École normale supérieure (ENS), l'Institut national de métrologie du Bureau national de métrologie (BNM-INM) et le Laboratoire primaire du temps et des fréquences du BNM (BNM-LPTF), France : une détermination absolue de la fréquence des transitions 5S–5D à deux photons dans le rubidium à $\lambda \approx 778$ nm a été effectuée au mois de janvier 1996 avec une incertitude-type composée de 2 kHz (soit, en valeur relative, 5×10^{-12}).

La priorité accordée à l'étude de lasers à YAG doublés en fréquence a conduit le BIPM à réduire son activité dans le domaine des lasers à CO₂ à $\lambda \approx 10,6 \mu\text{m}$. L'accélération de la pesanteur a été mesurée aux diverses stations qui ont servi au BIPM lors des comparaisons internationales de gravimètres absolus, à l'aide du gravimètre absolu FG5 du BIPM ; les résultats concordent mieux entre eux que ceux qui avaient été obtenus avec des gravimètres relatifs lors de la précédente comparaison internationale.

1996/1997 : Deux comparaisons importantes, effectuées sur des groupes de lasers à $\lambda \approx 633 \text{ nm}$, ont été achevées. L'une, avec les laboratoires de la North American Metrology Cooperation (NORAMET) a eu lieu au Centro Nacional de Metrología (CENAM) à Mexico : y ont pris part le CENAM (Mexique), le NIST et le Joint Institute of Laboratory Astrophysics (JILA), États-Unis, et le NRC (Canada). L'autre a eu lieu au National Institute of Metrology (NIM) à Beijing (Chine) et a concerné le KRISS (République de Corée), le NIM, le National Research Laboratory of Metrology (NRLM, Japon) et le Standards and Calibration Laboratory (SCL, Hong Kong). Ces deux comparaisons clôturent une série de comparaisons qui s'est déroulée durant les quatre dernières années et qui a relié entre eux une quarantaine de laboratoires appartenant à toutes les organisations régionales de métrologie actives dans ce domaine : l'Asia-Pacific Metrology Programme (APMP), la Cooperation in Metrology among the Central European Countries (COOMET), l'European Collaboration in Measurement Standards (EUROMET) et NORAMET. Toutes ces comparaisons ont été faites en se référant aux lasers du BIPM et ont nécessité, pour la plupart d'entre elles, le transport de nos lasers dans les laboratoires nationaux où la comparaison avait lieu. Les travaux sur de nouveaux systèmes laser se sont poursuivis, un effort particulier ayant été apporté cette année au laser à Nd:YAG doublé en fréquence à $\lambda \approx 532 \text{ nm}$.

1997/1998 : Des efforts accrus ont été consacrés aux travaux sur le laser à Nd:YAG doublé en fréquence et asservi sur l'iode à $\lambda \approx 532 \text{ nm}$. L'objectif de ces travaux est de réaliser un système portable hautement reproductible pour les comparaisons internationales. Les travaux se sont poursuivis aussi sur la mise au point d'un laser compact, avec une cavité à trois miroirs, à la longueur d'onde $\lambda \approx 543 \text{ nm}$. Bien que l'intérêt pour les comparaisons à la longueur d'onde traditionnelle $\lambda \approx 633 \text{ nm}$ reste élevé, on n'a effectué aucune comparaison internationale cette année. Par contre, des comparaisons bilatérales ont été effectuées et nous nous sommes efforcés de maintenir nos lasers de référence à leurs meilleures performances. À la suite d'autres travaux effectués sur des diodes laser à cavité étendue asservies sur l'iode à $\lambda \approx 633 \text{ nm}$, une comparaison internationale de ce type de lasers, à laquelle devraient participer cinq laboratoires nationaux, avait été envisagée au début de 1999. Suite à la décision d'affecter un scientifique chargé de ce travail à la section d'électricité, nos activités dans le domaine des diodes laser ont été très réduites à partir de la fin de 1998. Nous avons maintenu nos efforts dans le domaine des lasers à infrarouge à la longueur d'onde $\lambda \approx 3,39 \mu\text{m}$, à la

suite, en particulier, de l'achat à l'Institut Lebedev (Fédération de Russie) d'un nouveau laser qui a été livré au mois de juillet 1998 ; les préparatifs pour les comparaisons avec la PTB (Allemagne) et le JILA sont en cours. Les activités, limitées, dans le domaine de la nanométrie se poursuivent avec la mise au point d'un diffractomètre interférométrique à laser utilisant la méthode des trois longueurs d'onde. Cet interféromètre est conçu pour mesurer des règles périodiques de courte longueur, avec un espacement de l'ordre de 270 nm. En novembre 1997, la cinquième comparaison internationale de gravimètres absolus a eu lieu au BIPM. Quinze gravimètres absolus et quatorze gravimètres relatifs y ont pris part. L'évaluation des résultats est en cours.

1998/1999 : Les comparaisons internationales ont concerné principalement les lasers fonctionnant aux longueurs d'onde recommandées, $\lambda \approx 3,39 \mu\text{m}$ et $\lambda \approx 633 \text{ nm}$. Le laser du BIPM à $3,39 \mu\text{m}$, construit par l'Institut Lebedev, a été comparé au JILA à un autre laser de l'Institut Lebedev. Le BIPM a participé, avec ce laser, à une série de comparaisons visant à étalonner de manière absolue la fréquence de systèmes transportables à (He-Ne)/CH₄, principalement des lasers fabriqués à l'Institut Lebedev, et à la comparaison des chaînes de fréquence de la PTB et du BNM-LPTF. Les premières comparaisons de diodes laser à cavité étendue asservies sur l'iode à $\lambda \approx 633 \text{ nm}$, annoncées l'année précédente, ont été effectuées en janvier 1999 ; huit laboratoires nationaux y ont pris part. La stabilité de la fréquence de ces diodes laser, quand elles sont asservies sur des transitions très intenses de l'iode, est meilleure que celle obtenue habituellement avec les lasers à He-Ne. La stabilité de fréquence mesurée par battements entre nos deux lasers à YAG à infrarouge du commerce, et exprimée au moyen de l'écart-type d'Allan, est de 2×10^{-13} pour une durée moyenne de 100 ms. Cependant, les instabilités aux basses fréquences de ces lasers sont inquiétantes. Le travail dans le domaine de l'infrarouge a été suspendu puisque nos deux lasers à YAG présentent des défauts auxquels les fabricants ne sont pas encore en mesure de remédier. Dans le domaine de la nanométrie, une comparaison internationale préliminaire d'étalons à traits très serrés a commencé entre l'Office fédéral de métrologie (OFMET, Suisse), la PTB et le BIPM. Suite à la cessation des activités au BIPM dans le domaine des étalons à traits et à bouts, nous avons fait don, avec plaisir, des deux principaux instruments que nous avons utilisés pendant de nombreuses années, c'est-à-dire le comparateur photoélectrique et interférentiel de la SIP et l'interféromètre Tsugami, respectivement au CENAM (Mexique) et au National Institute of Standards (NIS, Égypte). Les deux instruments ont été expédiés à ces laboratoires. Nous avons consacré beaucoup de temps à la préparation de la publication concernant la mise en pratique de la définition du mètre, révisée en 1997. Ce travail a été effectué en collaboration avec le tout nouveau Groupe de travail du CCL sur la mise en pratique. Le texte définitif et ses annexes sont publiés dans le rapport du CCDM (1997) et dans *Metrologia* (1999, **36**, 211-244).

Masses

1995/1996 : La comparaison internationale d'étalons de 1 kg en acier inoxydable, qui a été entreprise à l'instigation du CCM, s'est poursuivie, le BIPM jouant le rôle de laboratoire pilote. Quinze laboratoires ont pris part à cette comparaison. La stabilité des étalons de transfert semble avoir été correcte au cours de la première année de comparaison. En même temps, la section des masses a poursuivi des recherches approfondies pour identifier d'éventuelles erreurs dues à la balance utilisée. Les études que nous poursuivons sur l'anélasticité des métaux sont maintenant centrées sur les suspensions flexibles. Une propriété spécifique aux rubans de torsion qui pourrait être mise à profit pour mesurer la constante gravitationnelle a été redécouverte, propriété que n'ont pas les fibres de torsion employées traditionnellement pour mesurer cette constante. Un appareil d'essai spécialement conçu pour vérifier la possibilité d'en tirer parti a été construit et les résultats sont prometteurs.

1996/1997 : La comparaison internationale d'étalons de masse de 1 kg en acier inoxydable a été presque achevée. La nouvelle balance à suspensions flexibles a été soumise à des essais de mise en service et, bien que l'on obtienne une répétabilité meilleure que le microgramme, elle a fait l'objet de quelques modifications simples qui devraient encore améliorer ses performances. L'expérience acquise dans l'étude de suspensions en cuivre-béryllium sous tension a été utile lors de la construction d'une nouvelle balance de torsion pour déterminer la constante newtonienne de gravitation, G . Une nouvelle balance hydrostatique destinée à la mesure de la masse volumique a été conçue et sa construction a été entreprise.

1997/1998 : La dernière étape de la comparaison internationale d'étalons de 1 kg en acier inoxydable s'est achevée cette année. Un projet de rapport a été envoyé aux participants. Les étalons prototypes de 1 kg du BIPM ont été réétalonnés par rapport au prototype n° 25. Cet exercice est renouvelé tous les cinq ans environ et sert à contrôler les variations de la masse de ces prototypes qui, pour des raisons de stabilité, ne sont pas nettoyés. La balance à suspensions flexibles, connue sous le nom FB-2, a été mise en service. L'écart-type des mesures est d'environ $0,03 \mu\text{g}$ en moyenne sur une journée. Les variations de masse observées d'un jour à l'autre entre deux étalons sont de l'ordre de $0,1 \mu\text{g}$. On ne sait pas vraiment si ces variations, très petites, correspondent à des variations de masse ou à des imperfections de la balance. La balance de torsion prototype conçue pour mesurer G a été munie d'un asservissement. Cela nous a permis d'étudier plus en détail les sources de bruit. Suite à ce travail, la construction d'une balance de torsion de conception améliorée a été décidée et a débuté.

1998/1999 : Le projet de rapport B sur la comparaison clé d'étalons de 1 kg en acier inoxydable organisée par le BIPM a été approuvé par les participants et un résumé a été présenté au CCM à sa session de mai 1999. Le CCM a

demandé de commencer les préparatifs en vue de la répétition de cette comparaison dont le laboratoire pilote sera à nouveau le BIPM. Une nouvelle balance de portée 1 kg a été achetée pour conserver et disséminer l'unité de masse. Notre balance prototype, FB-2, continue à bien fonctionner et a été utilisée pour des études sur la masse volumique de l'air et sur la stabilité d'objets en silicium. Les mesures de G se sont régulièrement améliorées. Pour répondre à l'accroissement de la charge de travail relative aux services de base dans le domaine des masses et de la masse volumique, la section des masses a été renforcée par le transfert, en avril 1999, de M. L.F. Vitouchkine, précédemment à la section des longueurs, qui, cependant, consacre encore une partie importante de son temps à la gravimétrie. De plus, une nouvelle assistante a été recrutée et a rejoint la section des masses du BIPM en septembre 1999.

Temps

1995/1996 : Les échelles de temps de référence, TAI et le Temps universel coordonné (UTC), ont été régulièrement établies et publiées chaque mois dans la *Circulaire T*. Depuis janvier 1996, conformément à une décision du CCDS, le TAI et l'UTC sont désormais calculés tous les cinq jours au lieu de dix jours précédemment, ce qui permet de les prédire plus efficacement pour les besoins en temps réel. L'exactitude des données reçues des étalons primaires de fréquence s'est considérablement améliorée, et il est devenu plus que jamais nécessaire d'améliorer toutes les étapes du calcul du TAI, depuis la comparaison des horloges jusqu'au traitement détaillé des données au BIPM.

1996/1997 : La stabilité à moyen terme du TAI, exprimée au moyen de l'écart-type d'Allan, était estimée à $1,3 \times 10^{-15}$ pour des durées moyennes d'environ quarante jours et son amélioration est, en grande partie, due à la mise en œuvre par les laboratoires nationaux d'un plus grand nombre de nouvelles horloges à césium HP 5071A, bien meilleures que les modèles plus anciens. D'octobre 1996 à septembre 1997, notre estimation de l'exactitude du TAI a été principalement fondée sur les résultats de deux étalons primaires, PTB CS2 et NIST-7, l'étalon primaire PTB CS3 n'étant pas encore assez fiable. Nous n'avons pas reçu de mesures de la fontaine à césium du BNM-LPTF depuis mai 1996. Une part importante de notre activité de recherche a concerné l'étude des comparaisons d'horloges par observations simultanées des satellites GPS et GLONASS à l'aide de récepteurs à canaux multiples.

1997/1998 : La stabilité à moyen terme du TAI, exprimée au moyen de l'écart-type d'Allan, a continué à s'améliorer. Elle était estimée à $1,0 \times 10^{-15}$ pour des durées moyennes d'environ quarante jours. Depuis octobre 1997, notre estimation de l'exactitude du TAI était fondée sur les résultats de sept étalons primaires de fréquence : les étalons classiques PTB CS1, CS2 et CS3,

la fontaine à césium de très haute exactitude LPTF-FO1, et les étalons à pompage optique NIST-7, CRL-01 et NRLM-4. Nos activités ont été en grande partie consacrées à l'étude des comparaisons d'horloges par observations simultanées des satellites GPS et GLONASS et des comparaisons de fréquence fondées sur des mesures de phase de la porteuse des signaux GPS. D'autres travaux de recherche ont été consacrés à la recherche de nouveaux pulsars et à l'extension du cadre relativiste pour la réalisation des temps-coordonnées.

1998/1999 : La stabilité à moyen terme du TAI, exprimée au moyen de l'écart-type d'Allan, est estimée à environ $0,6 \times 10^{-15}$ pour des durées moyennes de vingt à quarante jours. L'exactitude du TAI est fondée sur six étalons primaires de fréquence : les trois étalons classiques PTB CS1, CS2 et CS3, qui fonctionnent en continu, et les trois étalons à pompage optique NIST-7, CRL-01 et NRLM-4. En raison de l'augmentation du nombre des étalons primaires de fréquence et de l'amélioration de leur stabilité, l'unité d'échelle de temps du TAI correspond, selon nos estimations, à la seconde du SI à 5×10^{-15} près depuis le début de 1998. Nos activités de recherche ont été en grande partie consacrées à l'étude des comparaisons de temps et de fréquences à l'aide de systèmes de navigation par satellite tels que GPS et GLONASS. Un intérêt tout particulier a été porté aux techniques de réception simultanée des signaux de plusieurs de ces systèmes en mode multi-canal. Nous avons aussi travaillé à l'utilisation des mesures de phase de la porteuse des signaux GPS. D'autres activités de recherche furent consacrées aux systèmes de référence spatio-temporels, en particulier à la définition et à la réalisation des temps-coordonnées dans le cadre relativiste. Les autres thèmes de recherche concernent les pulsars, les projets d'utilisation d'horloges dans l'espace et l'interférométrie atomique. Suite à la nomination de Mme C. Thomas au nouveau poste de coordinatrice de la base de données du BIPM sur les comparaisons clés, en novembre 1998, le BIPM a recruté une nouvelle responsable pour la section du temps, Mme E.F. Arias ; cette personne prendra ses fonctions en novembre 1999.

Électricité

1995/1996 : Deux comparaisons d'étalons de tension de 1 V fondés sur l'effet Josephson ont été effectuées à l'aide de l'appareil transportable du BIPM, au NIM (Chine) et au Statens Provningsanstalt (SP, Suède). L'appareillage qui fournit un étalon de résistance à effet Hall quantique transportable, y compris le cryostat, l'aimant et le pont de résistance, a été transporté à la PTB (Allemagne) où a eu lieu la troisième comparaison sur place d'étalons à effet Hall. Les résultats montrent que les mesures effectuées avec les deux systèmes s'accordent à quelques 10^{-9} près, avec une incertitude-type composée relative d'une valeur à peu près équivalente. Les deux installations transportables, à effet Josephson et à effet Hall quantique, permettent d'assurer la traçabilité entre les laboratoires avec une incertitude

inférieure, d'un ordre de grandeur ou plus, à celle que fournissent les étalons voyageurs traditionnels. Le programme de comparaisons bilatérales d'étalons électriques s'est développé considérablement. Des étalons de transfert de $1\ \Omega$, fabriqués par le National Measurement Laboratory (CSIRO-NML, Australie), et des étalons de tension à diodes de Zener ont été achetés à cet effet. Ils seront envoyés par le BIPM aux laboratoires participant à des comparaisons bilatérales. L'assemblage d'un pont d'impédance, destiné à contrôler la valeur des étalons de capacité de référence du BIPM en fonction de la résistance de Hall quantifiée, a beaucoup progressé.

1996/1997 : Une réalisation majeure de cette année a été l'achèvement d'un pont d'impédance pour relier la résistance de Hall quantifiée à l'impédance de capacités étalons. Nous avons effectué des essais qui consistaient à comparer les résultats de déterminations de haute exactitude, effectuées à la PTB, du rapport de capacités dont les valeurs nominales sont dans le rapport 10, avec les résultats de mesures faites au BIPM à l'aide du nouveau pont d'impédance. Cette comparaison n'était pas encore terminée cette année-là, mais les résultats préliminaires indiquaient un accord à quelques 10^{-8} près, ce qui est très satisfaisant. Cette année-là, nous avons aussi transporté notre équipement à l'IEN (Italie) pour une comparaison d'étalons de 1 V à effet Josephson. D'excellents résultats ont été obtenus, ils sont comparables à ceux obtenus dans les comparaisons directes précédentes d'étalons à effet Josephson.

1997/1998 : Les réalisations majeures de cette année ont été une nouvelle comparaison d'étalons de 1,018 V à effet Josephson au Centro Español de Metrología (CEM, Espagne) et une nouvelle comparaison trilatérale d'étalons de 10 V à effet Josephson à la PTB, à laquelle le SP a participé. Une comparaison d'étalons de résistance de Hall quantifiée a eu lieu au NPL (Royaume-Uni). Une chaîne d'étalonnage a été établie avec succès entre les étalons de résistance de Hall quantifiée et un ensemble d'étalons de capacité. Elle nous a permis d'étalonner des étalons de capacité de 10 pF et de 100 pF par rapport à R_{K-90} avec une incertitude-type totale relative d'environ 4×10^{-8} . Des études sur l'influence de la température et de la pression sur les étalons de tension fondés sur des diodes de Zener ont montré qu'on pourrait corriger certaines erreurs pouvant atteindre plusieurs 10^{-7} dans les comparaisons bilatérales et les étalonnages. Les étalons voyageurs à diodes de Zener sont désormais opérationnels pour les comparaisons bilatérales. De même, cinq étalons de 10 k Ω et deux étalons de $1\ \Omega$ appartenant au BIPM sont maintenant disponibles pour les comparaisons bilatérales. Après étude préalable, six nouveaux étalons de résistance de $1\ \Omega$ donnés par le CSIRO en février 1998 sont disponibles pour servir aux comparaisons bilatérales.

1998/1999 : Les travaux de cette année se distinguent par une augmentation considérable du nombre de comparaisons. La cinquième comparaison sur place d'étalons de résistance de Hall quantifiée au plus haut niveau d'exactitude a été réalisée au NIST (Etats-Unis) et s'est révélée être un grand

succès. L'analyse préliminaire des résultats indique une différence de $1,2 \times 10^{-9}$, en valeur relative, entre les mesures de la résistance d'un étalon de 100Ω par rapport à la résistance de Hall quantifiée ; l'incertitude-type composée sur cette valeur est de 2×10^{-9} . La vingt-deuxième comparaison sur place d'étalons de Josephson a eu lieu au Slovenský Metrologický Ústav (SMU, Slovaquie) en mai 1999. Notre programme de comparaisons bilatérales au moyen d'étalons de transfert à diodes de Zener a été très chargé cette année : une demi-douzaine de comparaisons bilatérales ont été effectuées, la plupart au moyen de diodes de Zener appartenant au BIPM. Nous avons ainsi établi, durant ces deux dernières années, des liens solides avec quatre organisations régionales de métrologie, l'APMP, le COOMET, l'EUROMET et le SIM/NORAMET, dans le domaine des étalons de tension en courant continu. Nos études sur la résistance de Hall quantifiée à des fréquences de l'ordre du kilohertz ont confirmé l'existence d'une petite dépendance linéaire en fonction de la fréquence. Cependant, des travaux très récents, réalisés au BIPM en collaboration avec M. B. Kibble (chercheur invité), montrent qu'il est possible de la faire disparaître. De sérieuses améliorations ont permis de réduire les effets thermiques qui limitent l'amplitude maximale utilisable du courant alternatif pour les mesures de la résistance de Hall quantifiée de la plus haute exactitude. Des études sur le bruit et la stabilité des étalons de tension à diodes de Zener et des nanovoltmètres ont révélé la présence de corrélations, ce qui nous a incités à utiliser la variance d'Allan pour décrire la dispersion des mesures. Nous avons aussi commencé à appliquer un certain nombre de méthodes différentes d'analyse des séries temporelles, afin de déceler et d'évaluer quantitativement les corrélations entre les mesures individuelles successives ou les groupes de mesures successifs d'une série de résultats. Ces méthodes peuvent être appliquées à un vaste domaine de la métrologie.

Radiométrie, photométrie, thermométrie et pression

1995/1996 : Suite aux décisions prises par le CCPR lors de sa session de 1994, le BIPM a joué le rôle de laboratoire pilote pour deux comparaisons internationales en radiométrie et en photométrie. L'une a porté sur des radiomètres cryogéniques, l'autre sur la sensibilité lumineuse de photomètres. Pour la comparaison de radiomètres cryogéniques, qui est une comparaison indirecte, quatorze récepteurs à piège du type « tunnel » étaient en cours de construction au BIPM pour servir d'instruments de transfert pour la comparaison, en même temps que les récepteurs à piège déjà en service. Le radiomètre cryogénique du BIPM a été transporté, pour la première fois, dans un autre laboratoire, la PTB (Allemagne), où il a été comparé avec succès à un radiomètre cryogénique de fabrication différente. Nous avons entrepris au BIPM une réalisation radiométrique de la candela fondée sur le radiomètre cryogénique. Dans le domaine de la thermométrie, la comparaison internationale de cellules à point triple de l'eau a été achevée ;

les résultats ont été présentés au CCT en septembre 1996. Bien que les résultats de la plupart des laboratoires se situent dans les limites des incertitudes-types, en général de l'ordre de 0,1 mK, on a observé quelques différences plus grandes et la stabilité des cellules était moins bonne que prévu. Suite à la décision du CCM de commencer une comparaison internationale d'étalons de pression dans le domaine de la pression atmosphérique, à laquelle le BIPM prendra part, le BIPM a fait l'acquisition d'une balance de pression à piston en céramique pour cette comparaison.

1996/1997 : La plupart des activités ont été consacrées aux comparaisons internationales approuvées par le CCPR en 1994. Pour cela, le BIPM a été le laboratoire pilote de deux comparaisons, une de sensibilité de radiomètres cryogéniques au moyen de récepteurs à piège, comparaison qui devait s'achever en 1998, et l'autre de sensibilité lumineuse de photomètres, achevée durant l'été 1997. La première réalisation directe de la candela a été faite au BIPM : quatre photomètres du commerce, modifiés afin de les adapter à des ouvertures étalonnées achetées au NPL (Royaume-Uni), ont été étalonnés comme luxmètres pour fournir une réalisation radiométrique directe de la candela. Les réalisations précédentes des unités photométriques, maintenues au BIPM, étaient fondées sur un groupe de lampes dont les débits moyens étaient liés aux comparaisons internationales passées. Le résultat de la nouvelle réalisation a été comparé à ceux obtenus au cours de la comparaison internationale de photomètres et à la candela conservée au moyen de lampes depuis 1985 : l'accord a été excellent. Cette nouvelle réalisation et les futures réalisations du même type, fondées sur le radiomètre cryogénique du BIPM, vont améliorer la stabilité de la candela conservée au BIPM.

1997/1998 : Les comparaisons internationales entreprises sous l'égide du CCPR et dont le BIPM était le laboratoire pilote se sont poursuivies. La comparaison de radiomètres cryogéniques a été achevée. La comparaison de sensibilité lumineuse de photomètres a été presque terminée. Cette année, les efforts consacrés à la photométrie ont été bien plus importants que lors des années précédentes. Ces travaux ont été stimulés par la comparaison de flux lumineux mais aussi par les possibilités nouvelles offertes par l'utilisation de radiomètres cryogéniques. Une réalisation de la candela fondée sur un radiomètre cryogénique a montré un accord satisfaisant avec la candela conservée pendant de nombreuses années à l'aide d'une série de lampes. Profitant du travail de pionnier effectué par le NIST (États-Unis), et grâce à l'aide d'un chercheur associé de ce même laboratoire, M. Y. Ohno, nous avons effectué une réalisation indépendante du lumen avec une sphère intégrante. Les résultats ont montré que le facteur de réflexion du revêtement de la surface de la sphère intégrante est plutôt faible et qu'il possède un coefficient de température élevé. En collaboration avec le NPL, nous avons étudié à l'aide du manobaromètre primaire du BIPM les caractéristiques de la balance de pression destinée à être utilisée dans une comparaison clé d'étalons de pression organisée par le CCM. Dans le domaine de la thermométrie, nous avons participé, au point du gallium seulement, à une

comparaison clé d'étalons de température organisée par le CCT et coordonnée par le NIST.

1998/1999 : Nos activités ont été à nouveau centrées sur les comparaisons internationales. La comparaison de radiomètres cryogéniques et les deux comparaisons clés de photométrie sont achevées ; les valeurs de référence des deux comparaisons clés ont été approuvées par le CCPR. Le BIPM sera le laboratoire pilote de la comparaison clé de sensibilité spectrale dans le visible, dont les préparatifs sont en cours. Un nouvel équipement de mesure utilisant le rayonnement d'un corps noir a été mis en place et ses caractéristiques déterminées, ainsi qu'un système de mesure des aires d'ouverture. Le BIPM a aussi pris part à la comparaison clé du CCT de thermomètres à résistance de platine étalons à longue tige et à la comparaison du CCM de mesures de moyennes pressions.

Rayonnements ionisants

1995/1996 : Le travail de la section a continué à être dominé par les comparaisons internationales de dosimétrie des rayons x et γ et les comparaisons de mesures de radioactivité, ainsi que par la nécessité d'effectuer des étalonnages périodiques d'étalons secondaires pour des pays qui ne possèdent pas d'étalons primaires. Dans le domaine de la dosimétrie, des travaux de recherche ont été entrepris pour améliorer la détermination du facteur de correction qui compense la perte d'électrons et la diffusion des photons dans les chambres à paroi d'air, afin de déterminer le coefficient de recombinaison des ions dans les diverses chambres d'ionisation. Six comparaisons de kerma dans l'air ont été effectuées, l'une pour les faisceaux de rayons x mous, deux pour le rayonnement du ^{137}Cs et trois pour celui du ^{60}Co . Les dernières mesures pour la comparaison internationale de mesures de fluence neutronique à l'aide de sphères de Bonner comme instruments de transfert ont été effectuées au Japon. Cette comparaison devait s'achever à la fin de 1997. Dans le domaine de la radioactivité, la comparaison préliminaire, entre six laboratoires, de mesures du ^{204}Tl , est terminée, et la comparaison internationale devait commencer avant la fin de 1996. Les résultats de la comparaison préliminaire de mesures d'activité de l' ^{192}Ir ont été analysés. Le BIPM a participé à une comparaison de mesures d'activité de solutions de ^{63}Ni et de ^{55}Fe de l'EUROMET. Au cours de cette année, neuf laboratoires ont envoyé des ampoules pour étalonnage dans le SIR. Une nouvelle étude a été entreprise pour identifier et comptabiliser les radionucléides susceptibles de contaminer les ampoules utilisées dans les comparaisons internationales d'activité de radionucléides. En raison du départ à la retraite de M. J.W. Müller, la longue série d'études faite au BIPM sur les statistiques de comptage s'est achevée par une brève note sur la détermination des nombres premiers.

1996/1997 : Les récentes réunions des trois Sections du CCEMRI ont mis l'accent sur le fait qu'il est toujours nécessaire d'améliorer la traçabilité des mesures de rayonnements ionisants. Dans le domaine de la dosimétrie des rayons x et γ , les résultats des nouvelles comparaisons, qui ont eu lieu au BIPM avec un certain nombre de laboratoires, concordent bien avec ceux des comparaisons effectuées il y a quinze ans. Les comparaisons internationales de mesures d'activité ont une fois de plus servi à révéler des problèmes insoupçonnés dans la normalisation de nucléides qui semblent pourtant assez faciles à mesurer. L'extension du SIR aux émetteurs β sera considérée comme étant tout à fait opérationnelle après l'achèvement de la comparaison en cours, très prometteuse, de mesures d'activité de solutions de ^{90}Sr .

1997/1998 : Nous avons constaté un regain d'intérêt, de la part des laboratoires nationaux, pour de nouvelles comparaisons entre leurs étalons et ceux du BIPM dans le domaine de la dosimétrie des rayons x et γ , et pour de nouvelles mesures d'activité équivalente dans le SIR. Plusieurs études ont été menées au BIPM pour améliorer la mesure des grandeurs en dosimétrie et étendre certaines mesures à de plus hautes énergies. Dans le domaine de la radioactivité, l'étalonnage d'un détecteur Ge(Li), ainsi que l'analyse de l'influence de la non-uniformité des ampoules utilisées dans le SIR, a permis de déterminer avec exactitude le niveau d'impureté des solutions contenues dans les ampoules et ainsi de renforcer la cohérence des résultats du SIR.

1998/1999 : Cette année a été active dans le domaine des comparaisons de dosimétrie photonique. Une des conséquences de l'arrangement de reconnaissance mutuelle est que tous les laboratoires nationaux de métrologie, membres de la Section I du CCRI ont demandé à effectuer une comparaison bilatérale avec le BIPM. Cette année, onze comparaisons de ce type ont été achevées pour le kerma dans l'air et deux pour la dose absorbée. De plus, vingt-six étalonnages ont été réalisés pour des laboratoires conservant des étalons secondaires. Dans le domaine de la dosimétrie photonique, des calculs de Monte Carlo ont été effectués afin d'évaluer les facteurs de correction pour la perte d'électrons et pour la dispersion des photons dans les chambres à paroi d'air, dans le domaine situé entre 10 kV et 300 kV. Une grande partie des équipements pour la dosimétrie est considérée comme ancienne, aussi a-t-on commencé à la renouveler. En particulier le BIPM a fait l'acquisition d'une série de chambres d'ionisation étalons en graphite. Nous attendons toujours la livraison d'une nouvelle source de ^{60}Co ; le délai prolongé pour obtenir l'accord des autorités françaises pour le transport de la source au BIPM est un ennui majeur. Dans le domaine des radionucléides, la comparaison internationale de mesures d'activité du ^{204}Tl est terminée et ses résultats ont été présentés à la réunion de la Section II du CCRI en juin 1999. La comparaison internationale pilote de mesures d'activité du ^{152}Eu a commencé et les ampoules ont été mesurées dans le SIR avant d'être envoyées aux participants. Un grand nombre de résultats nouveaux a été ajouté au SIR cette année et nous finissons de mettre au point une monographie contenant tous les résultats du SIR enregistrés depuis sa

création en 1976. Ces données seront utilisées comme source d'informations sur l'équivalence des étalons nationaux dans ce domaine dans le cadre du MRA. Diverses études ont été terminées, ou sont en voie de l'être, sur divers aspects du fonctionnement du SIR et sur son extension aux émetteurs de rayonnement β à l'aide de la méthode de comptage par scintillation liquide. Parmi celles-ci, nous pouvons mentionner la détection des impuretés radioactives dans les ampoules soumises au SIR et la mise en pratique de la méthode de comptage du rapport des coïncidences triples aux coïncidences doubles.

Étalonnages

À côté de cet éventail très large de comparaisons internationales et des travaux de recherche qui les accompagnent, des étalonnages sont effectués pour un grand nombre de laboratoires nationaux de métrologie des États membres de la Convention du Mètre. En 1995/1996, le BIPM a établi cinquante-six Certificats d'étalonnage et deux Notes d'étude, en 1996/1997 cinquante-sept Certificats et huit Notes d'étude, en 1997/1998, cinquante-cinq Certificats et trois Notes d'étude et en 1998/1999 cinquante-sept Certificats et une Note d'étude.

Publications

Depuis octobre 1995 ont été publiés :

20^e Conférence générale des poids et mesures (1995), Comptes rendus des séances, 230 p.

Comité international des poids et mesures, Procès-verbaux des séances, T. **63** (84^e session, 1995), 220 p. ; T. **64** (85^e session, 1996), 219 p. ; T. **65** (86^e session, 1997), 354 p. ; T. **66** (87^e session, 1998), 279 p.

Rapport annuel de la section du temps du BIPM, Vol. **8** (1995), 156 p. ; Vol. **9** (1996), 162 p. ; Vol. **10** (1997), 143 p. ; Vol. **11** (1998), 141 p.

Comité consultatif d'électricité, 20^e session (1995), 76 p. ; 21^e session (1997), 135 p.

Comité consultatif de photométrie et radiométrie, 14^e session (1997), 80 p.

Comité consultatif de thermométrie, 19^e session (1996), 104 p.

Comité consultatif des unités, 12^e session (1996), 68 p. ; 13^e session (1998), 59 p.

Comité consultatif pour la définition de la seconde, 13^e session (1996), 81 p.

Comité consultatif pour la définition du mètre, 9^e session (1997), 163 p.

Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées, 6^e session (1996), 47 p.

Comité consultatif pour la quantité de matière, 2^e session (1996), 38 p. ; 3^e session (1997), 47 p. ; 4^e session (1998), 87 p. ; 5^e session (1999), 95 p.

Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants, 14^e session (1996), 140 p. ; 15^e session (1997), 227 p.

Circulaire T (mensuelle), 6 p.

Besoins nationaux et internationaux dans le domaine de la métrologie : les collaborations internationales et le rôle du BIPM, 1998, 132 p.

Le BIPM et la Convention du Mètre, réimpression, 1998, 63 p.

Le Pavillon de Breteuil : Bref historique de 1672 à nos jours, réimpression, 1998, 19 p.

Le Système international d'unités (SI), 7^e édition, 1998, 152 p.

À ces publications il convient d'ajouter une cinquantaine de rapports BIPM et environ 180 articles parus dans des revues scientifiques, des comptes-rendus de conférences et les volumes **33**, **34**, **35** et **36** de *Metrologia*. »

À l'issue du rapport de M. Kovalevsky, le président invite les délégués à faire part de leurs questions et remarques.

M. Plantenga (Pays-Bas) note que le nom de plusieurs Comités consultatifs a été changé pour mieux correspondre à l'extension de leur domaine d'activité, et se dit préoccupé de la pression de plus en plus forte exercée sur les Comités consultatifs et le Bureau international.

M. Kovalevsky répond que le Comité international est conscient de ce problème et qu'il doit être pris en considération dans l'éventualité où l'on envisagerait une réduction du budget du BIPM.

M. Quinn, directeur du BIPM, remarque que l'accroissement des activités des Comités consultatifs représente une charge supplémentaire pour les laboratoires nationaux de métrologie, de même que le nombre croissant de réunions des Comités consultatifs augmente bien évidemment la charge de travail du BIPM. Il n'y a jamais eu autant de réunions de Comités consultatifs depuis l'origine du Bureau que cette année. Depuis janvier 1999, plus de cinq cents représentants des laboratoires ont assisté aux réunions du BIPM. M. Quinn rassure M. Plantenga en disant qu'il n'est pas inquiet pour l'avenir du BIPM, mais il évoquera à nouveau cette question lors de la présentation du programme des travaux futurs du BIPM au point 12 de l'ordre du jour.

7 Rapport du Comité international sur les besoins nationaux et internationaux dans le domaine de la métrologie

M. W.R. Blevin présente le rapport intitulé *Besoins nationaux et internationaux dans le domaine de la métrologie : les collaborations internationales et le rôle du BIPM. Rapport préparé par le CIPM pour les Gouvernements des États membres de la Convention du Mètre*, rapport déjà mentionné par M. Kovalevsky au point 6 de l'ordre du jour (voir page 24).

Ce document d'une très grande importance a été largement diffusé ; il est inclus dans le volume des Comptes rendus de la 21^e Conférence générale et peut être consulté sur le site Internet du BIPM (www.bipm.org). M. Blevin en résume le contenu comme suit.

De nombreuses questions incitent les gouvernements nationaux à demander sans cesse une meilleure uniformisation des mesures sur le plan international et à souligner l'importance de l'accréditation et de la reconnaissance internationale des services de mesure et d'essais. Ces questions recouvrent : une forte tendance à la globalisation du commerce mondial ; la fabrication internationale délocalisée des produits manufacturés ; une plus grande complexité technique de nombreux produits et services, et une plus grande sensibilité aux questions relatives à la santé, à la sécurité et à l'environnement. Les accords commerciaux récents conclus entre États ou entre régions demandent spécifiquement que tous les signataires acceptent les résultats des mesures et essais réalisés par les autres intervenants. L'importance de plus en plus grande que revêt pour le commerce l'équivalence des services de mesure et d'essais aura une forte incidence sur les systèmes de mesure nationaux et internationaux. C'est dans un tel contexte que s'établissent les besoins nationaux à venir dans le domaine de la métrologie et des collaborations internationales. Les aspects de la métrologie faisant appel à une collaboration internationale régulière, et souvent renforcée, sont notamment : les accords relatifs à la définition et à la mise en pratique des unités de mesure, l'établissement d'étalons nationaux de mesure dont l'équivalence internationale puisse être démontrée, l'accréditation des laboratoires, la métrologie légale et la documentation sur les étalons. Une collaboration multilatérale dans ce domaine est indispensable au niveau international et régional.

Le rapport souligne que les programmes entrepris sous les auspices de la Convention du Mètre sont précieux et conclut qu'il convient de poursuivre la majorité des programmes en cours. Cependant, il existe un sentiment largement partagé selon lequel le BIPM et les Comités consultatifs du Comité international doivent faire plus pour aider les laboratoires nationaux de métrologie des États membres à démontrer les degrés d'équivalence entre

leurs étalons nationaux de mesure. Ce pas a déjà été franchi par le BIPM et par le Comité international par la mise en œuvre des comparaisons clés d'étalons de mesure organisées par le Comité international, par la coordination de ces comparaisons avec des comparaisons similaires organisées par les organisations régionales de métrologie, et par la mise en œuvre du MRA.

Le rôle des Comités consultatifs est appelé à être considérablement renforcé, par la mise en œuvre de programmes de travail plus dynamiques entre les sessions. Les critères pour être membre des Comités consultatifs ont été réexaminés et clarifiés, et des observateurs sont maintenant admis à participer aux réunions, ce qui permet à un plus grand nombre d'États membres de prendre part aux travaux des comités. Les missions de chaque comité seront précisées, et un membre du personnel scientifique du BIPM a été chargé de servir de secrétaire exécutif pour chaque comité. Le domaine des mesures prises en charge par chaque comité sera élargi et un, voire plusieurs comités supplémentaires, seront créés, de façon à couvrir globalement les principaux domaines de la métrologie pour lesquels une collaboration entre les laboratoires nationaux de métrologie est importante pour établir l'équivalence internationale entre les étalons. Il a été proposé puis décidé d'étendre le domaine couvert par les Comités consultatifs à l'acoustique, aux ultrasons, aux vibrations, au débit de fluides et à la viscosité, mais il existe d'autres domaines pour lesquels, tôt ou tard, il sera nécessaire d'établir l'équivalence internationale des étalons et des mesures. Le BIPM occupe une place privilégiée pour identifier ces besoins naissants et mettre en œuvre la collaboration internationale appropriée.

M. Blevin revient à une question déjà évoquée au point 6 de l'ordre du jour, pour ajouter qu'il est vital de faire évoluer le domaine d'activité des Comités consultatifs et, de même que certains domaines nouveaux ont été ajoutés, d'autres verront leur priorité réduite.

De nombreux organismes internationaux et régionaux sont maintenant concernés par la métrologie fondamentale et la métrologie appliquée. Au niveau international, le BIPM a entrepris de collaborer plus activement avec l'ILAC, l'ISO, l'OIML, et avec la CEI, et au niveau régional le BIPM collabore avec les organisations régionales de métrologie. Le Comité international a déjà pris l'initiative de la création du Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM, présidé par le directeur du BIPM.

Des stratégies ont récemment été adoptées qui permettent au BIPM d'aider les pays en voie de développement à renforcer leur système national de mesure, en particulier en le plaçant au rang des composantes essentielles de leur développement économique. Certaines des stratégies en question font appel à une collaboration étroite avec l'OIML, les organisations régionales de métrologie et avec l'IMEKO.

Dans son rapport, le Comité international établit quel sera le rôle du BIPM dans les premières décennies du 21^e siècle. Ce projet est accompagné d'une liste de vingt et une décisions relatives aux activités à venir du BIPM et des Comités consultatifs. Il est nécessaire que le BIPM mette en œuvre de temps à autre de nouveaux programmes, que ce soit en réponse à de nouveaux besoins des États membres ou pour bénéficier des progrès des sciences et de la technologie. L'impact de tels programmes sur le budget du BIPM dépend en grande partie de l'équilibre entre les besoins nouveaux en personnel et les économies qui peuvent être réalisées en mettant fin à certaines activités ou en les réduisant, ou en améliorant l'efficacité. Le programme à long terme pour les bâtiments mis en œuvre dans les années 1980 est presque achevé et il n'est pas envisagé de construire de nouveaux bâtiments au cours des prochaines décennies.

Le rapport se termine par une étude des implications financières de ce programme pour les États membres de la Convention du Mètre, y compris les besoins futurs relatifs au financement du BIPM, compte tenu de l'évolution prévisible de ses activités et des restrictions économiques maintenant imposées par la plupart des États membres. Cette partie du rapport est reprise au point 12 de l'ordre du jour.

M. Blevin conclut en disant que le Comité international a décidé à sa 88^e session (octobre 1999) qu'il est important de poursuivre l'étude des besoins à long terme et que le présent rapport sera mis à jour à l'avenir.

Mesdames et Messieurs les délégués sont invités à faire part de leurs questions.

M. Kildal (Norvège) ouvre la discussion en demandant ce qu'il est advenu de la proposition d'héberger le secrétariat de l'ILAC au BIPM. M. Blevin répond que des discussions ont eu lieu avec de hauts responsables de l'ILAC, qui ont admis qu'il serait bon d'établir des relations étroites entre le BIPM et l'ILAC. Cependant, l'ILAC n'est pas prêt à prendre une décision quant à la domiciliation éventuelle de son secrétariat au BIPM. M. Quinn ajoute que des discussions ont eu lieu avec le ministère français des Affaires étrangères quant aux implications juridiques d'une domiciliation du secrétariat de l'ILAC au BIPM. Le Comité international attend la réponse de l'ILAC.

M. Bordé suggère qu'il serait intéressant d'établir des relations avec les agences spatiales dans le domaine du temps et des fréquences. M. Kovalevsky répond que le Comité international a déjà établi de telles relations dans le domaine de l'astronomie spatiale, et attire l'attention sur la Recommandation 1 (CI-1999) adoptée par la 88^e session du Comité international, sur les futurs systèmes satellitaires de navigation à couverture globale et sur les échelles de temps UTC et TAI. Il remercie M. Bordé de ses commentaires et promet que le Comité international étudiera cette question.

M. Quinn mentionne aussi sa participation au projet STEP (Satellite Test of the Equivalence Principle), un programme de recherche dans l'espace ayant

pour but d'étudier le principe d'équivalence relativiste. Depuis plusieurs années le BIPM étudie la fabrication d'étalons de masse en platine iridié et les variations de leur masse volumique. Il est actuellement proposé que les masses destinées au projet STEP soient fabriquées à la PTB (Allemagne).

Au nom du Comité international, M. Blevin donne lecture du projet de résolution A sur les besoins à long terme dans le domaine de la métrologie (*voir* page 158). M. Sutton (Nouvelle-Zélande) se demande si le concept de « degré d'équivalence » a été bien défini et suggère qu'il ne suffit pas de mettre l'accent sur l'établissement de l'arrangement de reconnaissance mutuelle. M. Kovalevsky dit que le bureau du Comité étudiera la possibilité d'une nouvelle définition de ce concept, mais il est décidé que cette résolution ne fait pas appel à une définition spécifique du « degré d'équivalence ». Finalement, après plus ample considération, le bureau du Comité ne propose aucun changement et le projet de résolution A est adopté comme Résolution 1 (*voir* page 135), avec une abstention (Nouvelle-Zélande).

M. Blevin propose ensuite une liste de douze États membres composant le Groupe de travail sur la dotation ; ce groupe doit se réunir le 13 octobre au matin pour étudier le projet de résolution M (*voir* page 180) et faire des suggestions à la Conférence générale. La liste est acceptée, avec l'adjonction du Danemark, cette délégation ayant manifesté le souhait d'y participer. La liste des membres de ce groupe de travail et le rapport sur les discussions sont présentés au point 13.1 (*voir* page 122).

M. Inglis (Australie) affirme son soutien au projet de programme de travail du BIPM, notant qu'il considère le niveau de financement demandé comme absolument indispensable.

8 Traçabilité des étalons de mesure au niveau mondial

À l'invitation du président, M. Quinn ouvre la discussion sur la traçabilité des étalons nationaux de mesure et présente les projets de résolution B et D (*voir* pages 160 et 164 respectivement).

La Résolution 2 de la 20^e Conférence générale a établi les bases d'une action importante relative à la reconnaissance mutuelle, sur le plan international, des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage et de mesurage émis par les laboratoires nationaux de métrologie. La nécessité d'une

traçabilité internationale des étalons de mesure est maintenant universellement reconnue. Le problème rencontré par les laboratoires nationaux de métrologie est de savoir comment y parvenir tout en évitant de mettre en œuvre un nombre ingérable d'arrangements multilatéraux d'équivalence des étalons de mesure. Il aurait été bien sûr possible d'envisager des arrangements bilatéraux au sein d'organisations régionales qui regroupent géographiquement les laboratoires nationaux de métrologie, mais on a pensé qu'un système global pourrait être mis en place par le biais d'arrangements bilatéraux entre les groupes régionaux.

Lors de la première réunion des directeurs des laboratoires nationaux qui a eu lieu en février 1997, le directeur du BIPM avait proposé d'essayer de mettre en œuvre directement un accord au niveau international plutôt qu'un réseau d'accords régionaux. Cette proposition a engendré bien des discussions et un large consensus a été atteint par correspondance pour essayer de mettre en œuvre un accord international. Après avoir consulté largement les directeurs des laboratoires nationaux de métrologie, et après discussion lors de la session du Comité international de septembre 1997, un projet d'accord a été présenté aux directeurs des laboratoires nationaux en février 1998. Après quelques changements ultérieurs, ce projet a été paraphé par les directeurs de laboratoires nationaux de métrologie de trente-neuf États membres, avant de procéder à la signature du texte final, lors d'une réunion dont la date coïnciderait avec la 21^e Conférence générale. Le projet paraphé par les directeurs a été envoyé aux représentants diplomatiques des États membres à Paris en mai 1998 pour informer officiellement les gouvernements des États membres de cette proposition. Ce projet a été modifié par la suite, mais seulement sur des points de détail, après consultation des directeurs, avant de préparer le texte final en août 1999 pour le soumettre à signature en octobre 1999.

Le projet fait référence à un Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM. Ce comité a été créé par le Comité international en septembre 1997 et a tenu sa première session en février 1998 sous la présidence du directeur du BIPM.

M. Quinn présente ensuite le projet de résolution B (*voir* page 160), et met à jour le texte en remplaçant le mot « accord » par « arrangement ». M. Göbel (Allemagne) exprime son soutien à l'arrangement de reconnaissance mutuelle et remercie le directeur pour son action. M. Sutton (Nouvelle-Zélande) se joint à lui pour remercier et féliciter le directeur du BIPM pour la célérité avec laquelle cet arrangement a été mis en place.

Une discussion s'engage ensuite dans laquelle M. Quinn dit clairement que cet arrangement n'est nullement contraignant et n'a pas l'intention de l'être. Il termine en disant que les derniers amendements mineurs apportés au texte en 1999 avaient pour but de le dire clairement. M. Sutton propose ensuite de modifier le projet de résolution pour encourager tous les États, et pas seule-

ment les signataires de cet arrangement, à l'utiliser pour établir la traçabilité de leurs propres étalons nationaux de mesure.

Après un changement rédactionnel mineur pour prendre en compte les commentaires de la Nouvelle-Zélande, le projet de résolution B est approuvé à l'unanimité comme Résolution 2 (*voir* page 136).

L'arrangement de reconnaissance mutuelle a été signé à Paris le 14 octobre 1999 lors d'une réunion des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie des États membres de la Convention du Mètre. Les directeurs des laboratoires nationaux de métrologie de trente-huit États membres de la Convention du Mètre et des représentants de deux organisations internationales ont signé ce document, qui est inclus dans ce volume. La liste des signataires et le texte complet peuvent être consultés sur le site Internet du BIPM (www.bipm.org).

M. Lam (Singapour) suggère que le BIPM rédige un communiqué de presse au sujet de l'arrangement et incite les États membres à y donner suite. M. Quinn répond qu'une telle action incombe aux laboratoires nationaux de métrologie et pas au BIPM.

M. Quinn présente aussi le projet de résolution D, sur la nécessité d'utiliser les unités du SI (*voir* page 164). Cette résolution est adoptée à l'unanimité, sans changement, comme Résolution 4 (*voir* page 138).

9 Admission d'Associés à la Conférence générale

M. Kovalevsky présente ensuite la proposition de créer un statut d'Associé à la Conférence générale. L'établissement du MRA a mis en lumière la nécessité de trouver un moyen de raccorder au SI les activités métrologiques d'un nombre d'États beaucoup plus grand que celui des États qui sont actuellement membres de la Convention du Mètre. Le commerce international exige de plus en plus la traçabilité au SI des mesures des États qui participent au commerce mondial, mais bien des États plus modestes peuvent trouver difficile d'acquitter la contribution annuelle, même minimale, demandée pour être membre de la Convention du Mètre (0,5 % de la dotation du BIPM). Comme l'exclusion de certains pays pourrait être considérée comme une barrière technique au commerce, le Comité international estime que la Conférence générale doit prendre la responsabilité de

fournir un mécanisme permettant d'établir la liaison au SI des systèmes de mesure de tous les États et entités économiques, y compris ceux qui ne sont pas membres de la Convention du Mètre. La participation au MRA par le biais des organisations régionales de métrologie semble un moyen d'y parvenir. Il est cependant nécessaire d'établir un lien officiel au BIPM et une contribution financière doit être apportée pour en couvrir les coûts. La Convention du Mètre n'a pas prévu de statut d'« Associé », mais, à l'inspiration de l'OIML, le Comité international propose que la 21^e Conférence générale crée une catégorie d'Associés à la Conférence générale, destinée en particulier aux plus petits États qui pourraient avoir des difficultés à acquitter une contribution normale à la Convention du Mètre. Cette proposition, qui a le soutien du Gouvernement français, dépositaire de la Convention du Mètre, est présentée au projet de résolution C (*voir* page 161).

M. Kovalevsky rappelle aux délégués que le MRA est destiné à établir l'équivalence internationale des mesures et la traçabilité des mesures au SI, lesquelles seront démontrées au niveau international par le biais de la base de données du BIPM sur les comparaisons clés. L'accès à la base de données du BIPM sera libre, mais, pour le moment, seuls les signataires de la Convention du Mètre ont le droit de participer aux comparaisons clés et de faire figurer leurs aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages dans la base de données.

Le statut d'Associé donnerait aux États et entités économiques le droit de participer à la Conférence générale en qualité d'observateurs, sans droit de vote, celui de participer à l'arrangement de reconnaissance mutuelle et d'inclure leurs résultats dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés par le biais des comparaisons régionales. Toutefois, ils ne bénéficieront pas des autres avantages liés à la signature de la Convention du Mètre. Par exemple, les Associés à la Conférence générale et leurs laboratoires nationaux de métrologie ne bénéficieront pas :

- de la fourniture d'étalons par le BIPM, y compris les kilogrammes en platine iridié ;
- d'étalonnages gratuits par le BIPM d'un certain nombre d'étalons nationaux de mesure ;
- de la participation aux comparaisons du Comité international ou du BIPM ;
- de la participation active aux Comités consultatifs et à la Conférence générale ;
- de la possibilité pour un ressortissant national d'être élu membre du Comité international ;
- de participer aux réunions des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie.

Il ajoute que le Comité international a décidé, lors de sa 88^e session (1999), que les États membres en retard sur le paiement de leur contribution doivent commencer par payer leurs dettes aux autres États membres avant de demander à bénéficier du statut d'Associé.

M. Kovalevsky présente ensuite le projet de résolution C (*voir* page 161) et ouvre la discussion. Il accepte la suggestion de M. Carneiro (Danemark) de remplacer l'expression « système de mesure mondial » par « infrastructure de mesure mondiale ».

M. Castelazo (Mexique) soulève le problème d'un État membre en retard sur le paiement de ses contributions et dans l'incapacité de payer ses dettes dans l'immédiat. Un tel État se verrait-il exclu des Conférences générales ? M. Kovalevsky répond que tel serait le cas, et ajoute que le Comité international a examiné cette éventualité avec soin et a conclu que les dettes, qui concernent tous les États membres, ne peuvent pas être tout simplement effacées par le Comité international. Au contraire, selon la décision du Comité international en 1998, des arrangements ont été recherchés avec les États débiteurs pour qu'ils puissent effectuer un paiement échelonné de leur dette, sur un certain nombre d'années. La décision d'exclure un État membre d'une Conférence générale doit être formulée à l'État en question au moins six mois avant l'ouverture de la Conférence.

M. Sutton (Nouvelle-Zélande) s'interroge quant à la proposition de donner à des unions scientifiques internationales et à d'autres organisations internationales le statut d'organisations associées. M. Kovalevsky explique que cela donnerait un caractère officiel à la coopération avec ces organisations internationales, et aiderait à améliorer l'efficacité des contacts. M. Quinn souligne l'importance d'une étroite collaboration, en particulier avec des organisations telles que l'IFCC et l'UICPA, même s'il reconnaît qu'il est difficile de choisir les organisations internationales appropriées. Mme Brown (États-Unis) demande s'il y a des restrictions relatives aux organisations et unions internationales susceptibles d'obtenir le statut d'Associé. M. Kovalevsky répond que le bureau du Comité considérera à nouveau la question de l'admission d'organisations internationales à la lumière de cette discussion.

M. Érard (France) note que l'Institut des matériaux et mesures de référence (IRMM) effectue des étalonnages et demande s'il devrait signer le MRA, dans l'éventualité où il souhaiterait participer aux activités qui y sont liées. M. Kovalevsky répond que l'IRMM est déjà membre d'un Comité consultatif, et M. Quinn souligne la distinction qui existe entre les Associés à la Conférence générale et les signataires du MRA. Les Associés à la Conférence générale seront admis à signer l'arrangement. L'IRMM et l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) ont été invités à le signer en qualité d'organisations internationales.

M. Faber félicite le Comité international au nom de tous les États membres de l'OIML. M. Kovalevsky répond que le point suivant de l'ordre du jour

traitera des relations entre le Comité international et l'OIML, et dit que la présence de M. Faber à cette réunion démontre que l'OIML est déjà invitée à la Conférence générale !

Après quelques changements rédactionnels mineurs, le projet de résolution C est adopté comme Résolution 3 (*voir* page 137), avec une abstention (Espagne).

10 Relations avec l'Organisation internationale de métrologie légale

M. Kovalevsky fait la déclaration suivante.

« Je rappelle que la Résolution 10 (1995) de la 20^e Conférence générale a invité le président du Comité international des poids et mesures et le président du Comité international de métrologie légale (CIML) à créer un groupe de travail commun pour définir les moyens d'accroître leur coopération et leur efficacité dans la réalisation de leurs objectifs et l'emploi de leurs ressources, y compris, mais non exclusivement, pour étudier la possibilité de fusionner les deux organisations. La même résolution a également invité le Comité international, après avoir reçu le rapport de son président, à faire connaître aux États membres de la Convention du Mètre les résultats des discussions et son opinion au sujet de l'opportunité de poursuivre des actions dans ce sens.

Trois réunions ont ainsi été organisées entre les bureaux du CIML et du Comité international en 1996, 1997 et 1998. Lors de la première réunion, il a été décidé que l'ILAC, l'organisation internationale pour l'accréditation, serait invitée à y participer, étant donné que les problèmes de traçabilité sont au centre des relations entre la Convention du Mètre et l'OIML ; une coopération étroite entre ces trois organismes serait bénéfique pour la société dans son ensemble.

Avant de vous présenter les résultats et l'état actuel des relations entre les deux organismes, il me paraît utile de rappeler comment ce rapprochement souhaité par la Conférence générale a été abordé.

À l'origine, le ministère français des Affaires étrangères avait informé M. Quinn et moi-même « que le Gouvernement français verrait d'un œil favorable une modification de la Convention du Mètre qui permettrait d'incorporer les activités actuellement prises en charge par l'OIML ». Dans le même document, figurait la phrase suivante : « La position prise par le ministère français des Affaires étrangères est que c'est une question qu'il est bon de se poser et que, après avoir considéré la situation, le ministère soutiendrait ce qui reviendrait à reprendre l'OIML par la Convention du Mètre ».

Ayant en vue cette proposition, le Comité international a constaté qu'il y avait, en principe, trois moyens d'arriver à une seule organisation intergouvernementale pour la métrologie : 1) créer une nouvelle convention intergouvernementale ; 2) maintenir une des deux conventions, mais en la modifiant ; 3) maintenir une des deux conventions, sans modification.

Le Comité international, en ayant délibéré, a pris la position suivante : compte tenu des difficultés politiques énormes qui accompagneraient la création et la signature d'une nouvelle Convention, seules les deux dernières options sont viables. Il s'est prononcé pour la troisième option, mais pourrait accepter la seconde. De plus, le Comité international a proposé, au cas où une de ces deux solutions serait adoptée, de créer, dans son sein, un Comité pour la métrologie légale, composé des représentants des institutions ou États qui sont actuellement membres à part entière de l'OIML ou membres de la Convention du Mètre, et qui travaillerait sous la responsabilité du Comité international.

Cette information ayant été transmise au ministère, la réponse de celui-ci a été plus nuancée que la première fois : « Le Gouvernement français, pour sa part, verrait favorablement le rapprochement des deux organisations créées par ces conventions en vue d'une éventuelle fusion, selon des modalités à fixer ».

Je rappelle qu'en français « éventuelle » ne signifie pas, comme en anglais, un objectif final défini, mais a le sens de « possible, contingent, liable to happen ».

On y voit apparaître l'idée de rapprochement qui a depuis fait son chemin et c'est dans ce sens que la Conférence générale a voté la Résolution 10 (1995) que j'ai citée au début de mon exposé. Lors de sa 30^e réunion, une résolution analogue a été adoptée par le CIML.

Cependant, le point de vue de l'OIML était différent de celui du Comité international, en ce sens qu'il ne lui paraissait pas possible de fusionner les deux organisations sans modifier la Convention du Mètre. Le Comité international, prolongeant ses réflexions sur ce sujet, s'écartait de la deuxième option présentée tout à l'heure. Il craignait de plus en plus, non seulement les difficultés diplomatiques et la perte de temps qu'impliquerait la signature même d'une modification de la Convention, mais aussi que les diplomates ne

modifient ce que les métrologues souhaiteraient y mettre, et constatait que cela n'amènerait ni l'augmentation de l'efficacité ni la réduction de coût susceptibles de justifier les efforts pour y parvenir. Tout ceci étant en contradiction avec la position de l'OIML, cette idée de fusion a été, du moins provisoirement, abandonnée.

Il n'en demeure pas moins vrai que la troisième proposition du Comité international, consistant à créer au sein de la Convention du Mètre un Comité pour la métrologie légale, reste valable et que nous sommes prêts à en discuter les modalités. Il s'agit certes d'un problème difficile, car des pays membres de l'OIML ne souhaitent pas forcément assumer le coût d'être membre de la Convention du Mètre s'ils n'estiment pas que les avantages afférents leur sont utiles. Il y aurait pourtant des solutions possibles que la souplesse de la Convention du Mètre et la latitude laissée au Comité international pour l'interpréter nous permettent d'envisager. De même que nous envisageons de créer des Associés à la Conférence générale, on pourrait envisager, par exemple, de créer des Associés au Comité de métrologie légale, dont le nombre serait limité : dix-sept membres de l'OIML ne sont pas membres de la Convention du Mètre et neuf membres de la Convention du Mètre ne sont pas membres de l'OIML. De même, l'invitation d'installer les services de ce Comité au Pavillon de Breteuil reste valable. Ainsi, la porte n'est pas définitivement fermée et, sinon maintenant, le dossier pourrait être rouvert dans quelques années.

Ces divergences n'ont pas empêché l'OIML et le Comité international de rechercher un rapprochement par la mise en œuvre d'actions communes. D'ores et déjà, l'OIML et la Convention du Mètre ont travaillé conjointement avec d'autres organismes à la rédaction du VIM et du GUM. Le Comité commun pour les guides en métrologie, dont j'ai parlé dans le rapport du président, est actuellement en train de réviser ces ouvrages dans une action menée de concert par l'OIML et le BIPM. Une autre réalisation qui a connu un grand succès se rapporte à nos relations avec les pays en développement. Ce fut l'organisation, en juin 1998 à Braunschweig, en liaison aussi avec l'IMEKO, d'un grand séminaire sur le rôle de la métrologie dans le développement économique et social. Soixante-dix-neuf pays et dix-sept organisations internationales ou régionales y ont participé. C'est à cette occasion que le Cameroun, État membre de la Convention du Mètre, mais qui avait cessé depuis des années de participer à nos activités, a repris contact avec le BIPM et a réintégré la Convention du Mètre.

Pour en revenir à la coopération avec l'OIML, un certain nombre de points avaient été évoqués, sans qu'aucune suite n'ait jusqu'à présent été donnée. Or, il semble que les perspectives ouvertes par l'extension des domaines couverts par le Comité international, ainsi que la mise en œuvre de l'arrangement de reconnaissance mutuelle, ouvrent des voies nouvelles où la collaboration entre l'OIML et le CIPM serait fructueuse. D'ores et déjà, l'OIML participe, par son groupe TC10/SC5 au Groupe de travail du CCM sur la dureté.

L'extension de l'intérêt du Comité international vers les mesures de débits gazeux ou liquides devrait concerner l'OIML au premier chef, par suite de l'importance dans le domaine légal du commerce de fluides (essence, gaz de ville, etc.). D'autres exemples suivront, même si la politique du Comité international est de ne pas prendre l'initiative dans des domaines déjà pris en compte par d'autres organismes.

En ce qui concerne le MRA, qui assurera l'équivalence des étalons et des certificats d'étalonnage des laboratoires signataires, les conséquences sur les contrôles à l'exportation et à l'importation sont évidents, aussi bien que sur la cohérence technique des réglementations nationales.

En conclusion, en réponse à la Résolution 10 (1995) de la 20^e Conférence générale, le Comité international avise les États membres de la Convention du Mètre qu'il a engagé des actions en vue d'améliorer la collaboration avec l'OIML, que les perspectives de développer dans l'avenir cette collaboration sont bonnes dans plusieurs domaines, mais qu'il n'y a pas lieu de mener, à l'heure actuelle, d'action supplémentaire quant à la proposition de fusion des deux organismes.

Suite à la déclaration de M. Kovalevsky, M. Faber dit qu'il espère que le CIPM et l'OIML continueront à étudier la possibilité d'actions communes à venir. M. Imai (Japon) ajoute que l'APMP accueille favorablement les discussions entre l'OIML, l'ILAC et le CIPM.

11 Rapports des présidents des Comités consultatifs

11.1 Comité consultatif des longueurs

M. Chung Myung Sai, président du Comité consultatif des longueurs (CCL), appelé précédemment le Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM), présente son rapport sur les activités de ce comité, ainsi que les projets de résolution E, sur la révision de la mise en pratique de la définition du mètre (*voir* page 166), et de résolution F, sur les besoins en métrologie dimensionnelle (*voir* page 167).

Le CCL a tenu sa 9^e session au BIPM les 16, 17 et 18 septembre 1997.

Bien que le BIPM et les laboratoires nationaux de métrologie aient effectué de nombreuses comparaisons pour établir la traçabilité, le commerce

international et les accords d'accréditation demandent maintenant d'élargir la portée des comparaisons entreprises pour établir de manière officielle et documentée l'équivalence des étalons nationaux de mesure et, en particulier, l'équivalence des services d'étalonnage de routine. Le CCL a tenu compte de ces nouveaux besoins pour établir la liste des comparaisons clés qui serviront de fondement technique au MRA. Les comparaisons clés, qui vérifient les aptitudes d'un laboratoire dans le domaine des mesures de longueur, ne devraient pas seulement concerner les étalons primaires mais aussi les activités de ce laboratoire en général, afin que les certificats d'étalonnage soient reconnus d'un laboratoire à l'autre. Les critères suivants ont été établis par le Groupe de travail du CCL sur la métrologie dimensionnelle pour choisir au mieux les comparaisons et veiller à leur bon déroulement :

- 1) Une comparaison clé doit correspondre à une technique clé du domaine, être importante pour l'ensemble des laboratoires nationaux de métrologie, offrir le meilleur lien possible avec les comparaisons régionales, satisfaire aux besoins d'accréditation et être répétée à des intervalles déterminés.
- 2) Les étalons employés pour une comparaison clé doivent être faciles à se procurer (et être remplaçables s'ils sont endommagés), avoir obtenu de bons résultats lors de comparaisons précédentes, être utiles à l'industrie, être stables, et être un défi au savoir-faire des laboratoires.
- 3) Les laboratoires participants doivent effectuer ces mesures dans le cadre de leur service d'étalonnage (maintenant ou à l'avenir), ils doivent obtenir des incertitudes de mesure inférieures à un niveau donné, ils doivent avoir le plein contrôle de la traçabilité des éléments instrumentaux qui contribuent le plus à l'incertitude de mesure, et ces laboratoires doivent être volontaires pour participer aux comparaisons régionales.

Sur la base de ces critères, le groupe de travail a identifié six comparaisons clés en métrologie dimensionnelle. Elles seront toutes en cours en l'an 2000 ; les comparaisons clés, le laboratoire pilote et la date de début des mesures sont les suivants :

- CCL-K1 : cales étalons, OFMET (Suisse), mars 1998 ;
- CCL-K2 : cales étalons de grande longueur, NPL (Royaume-Uni), septembre 1999 ;
- CCL-K3 : polygones optiques, Council for Scientific and Industrial Research (CSIR, Afrique du Sud), juillet 1998 ;
- CCL-K4 : étalons de diamètre cylindriques, NIST (États-Unis), septembre 1998 ;
- CCL-K5 : calibres à gradins et barres à boules pour machines à mesurer, PTB (Allemagne) et NIST, mars 1998 ;
- CCL-K6 : plaques à billes bi-dimensionnelles pour machines à mesurer, CENAM (Mexique), janvier 2000.

Le Groupe de travail du CCL sur la métrologie dimensionnelle s'est réuni à San Diego en juillet 1998 et au BIPM en septembre 1999.

Outre les comparaisons clés en métrologie dimensionnelle, le CCL a adopté comme comparaison clé la comparaison continue du BIPM de fréquence de lasers à He-Ne asservis sur l'iode à $\lambda \approx 633$ nm, sous la référence provisoire BIPM.L-K1. Depuis la précédente Conférence générale, les laboratoires nationaux de métrologie d'une trentaine d'États membres ont participé à cette comparaison clé.

Le CCL a discuté des raisons qui ont motivé les modifications apportées à la mise en pratique de la définition du mètre de 1992, y compris les propositions de nouvelles radiations recommandées. Un certain nombre de points ont été discutés. De nouvelles mesures plus exactes de la radiation d'un laser à Nd:YAG à fréquence doublée asservi sur la raie d'absorption de l'iode à $\lambda \approx 532$ nm réduiront bientôt l'incertitude relative de sa fréquence au-dessous du niveau actuel de 7×10^{-11} , le rapport signal-sur-bruit élevé du signal d'asservissement de ce laser l'a rendu populaire dans de nombreux laboratoires mettant au point de tels systèmes. Deux laboratoires ont fait part de mesures préliminaires de la transition à $\lambda \approx 674$ nm d'ions de strontium piégés et refroidis, qui montrent les potentialités des ions piégés pour de futurs lasers de référence de haute exactitude. Le laser fondé sur la transition à deux photons dans le rubidium ($\lambda \approx 778$ nm) est séduisant parce qu'il est fondé sur des diodes laser et qu'il est transportable. La transition 1S-2S à deux photons dans l'hydrogène constitue la référence de la plus haute exactitude pour les courtes longueurs d'onde ($\lambda \approx 243$ nm). Le laser à CO₂ asservi sur le tétraoxyde d'osmium ($\lambda \approx 10$ μm) joue un rôle pivot dans les chaînes de fréquence puisqu'il permet de relier l'infrarouge au visible.

Le groupe de travail chargé de préparer une nouvelle liste de radiations recommandées a présenté un projet à la session du CCL. La liste de radiations recommandées est divisée en deux groupes. Toutes les radiations recommandées ont le même statut quant à la réalisation du mètre. Cette division vise à séparer les anciens étalons des nouveaux. Les anciens étalons sont de moins en moins employés, il n'est donc pas conseillé de fonder de nouveaux équipements sur ces étalons.

Le CCL a approuvé les propositions de changements à la mise en pratique qui consistent : 1) à ajouter, dans l'introduction, la définition du mètre et les trois méthodes pour sa réalisation, 2) à réviser la fréquence attribuée à la raie du calcium et 3) à ajouter cinq nouvelles radiations à la liste des radiations recommandées. Une des autres propositions de ce groupe concerne la publication des valeurs recommandées pour les lampes spectrales encore en service. La nouvelle mise en pratique de la définition du mètre, approuvée par le Comité international, a été publiée dans *Metrologia* (1999, **36**, 211-244).

Suite aux réponses favorables au questionnaire envoyé par le Bureau international, un nouveau groupe de travail sur la mise en pratique a été formé. Il est chargé d'en examiner le contenu et de proposer des changements, de présenter une liste de comparaisons clés et de préparer la création d'une base de données des fréquences de lasers asservis.

Le CCL a discuté des travaux au Bureau international. Le remplacement éventuel du laser à He-Ne asservi sur l'iode à $\lambda \approx 633$ nm a été évoqué ; à la suite d'une discussion générale, les participants ont conclu que le laser à $\lambda \approx 633$ nm reste utile tant que les interféromètres laser du commerce et que les étalons secondaires, de faible coût, continueront à être fondés sur cette longueur d'onde. Les systèmes rivaux sont le laser à Nd:YAG doublé en fréquence à $\lambda \approx 532$ nm et le laser à diode asservi sur la transition à deux photons du rubidium à $\lambda \approx 778$ nm. Une autre possibilité est la synthèse de fréquences, étudiée au Bureau international en collaboration avec d'autres laboratoires à Paris. La métrologie dimensionnelle est un domaine trop vaste pour que le Bureau s'y engage. Il est suggéré qu'il concentre ses efforts sur des étalons transportables pour la dissémination du mètre, tout en ayant une certaine activité dans le domaine de la nanométrie.

La prochaine session du CCL devrait avoir lieu en 2001.

M. Bordé remercie M. Chung pour la présentation de son rapport et souligne la rapidité avec laquelle le domaine évolue, mentionnant aussi les liens étroits avec les travaux de la communauté du temps et des fréquences. Il souligne les récents progrès des mesures dans l'infrarouge et l'ultraviolet, avec des lasers à gaz carbonique et à hydrogène, respectivement. Il est cependant préoccupé par le fait que, bien que la radiation étalon de l'hydrogène figure dans la mise en pratique révisée, la mise en œuvre de cet étalon est très difficile et un seul laboratoire dans le monde est capable de le réaliser. Il souligne que l'on pourrait peut-être demander à M. Klepner, du Massachusetts Institute of Technology (MIT, États-Unis), qui a effectué avec succès des travaux sur la condensation de Bose-Einstein de l'hydrogène, de réaliser un étalon à cette fréquence. Il mentionne ensuite les mesures récentes de la transition $1S-2S$ dans l'hydrogène, réalisées avec l'étalon primaire de fréquence à césium français, et demande d'explorer davantage ce domaine.

M. Chung remercie M. Bordé, et M. Quinn poursuit en disant que le Groupe de travail du CCL sur la mise en pratique a étudié très attentivement toutes les transitions mentionnées dans les directives pour la mise en pratique de la définition du mètre. Seules les longueurs d'onde bien établies peuvent y figurer. L'introduction d'un certain nombre de longueurs d'onde qui résultent de techniques de pointe est, toutefois, source d'encouragement pour les travaux à venir sur les constantes fondamentales.

Le projet de résolution E est approuvé à l'unanimité comme Résolution 5 (voir page 139).

M. L.K. Issaev (Fédération de Russie) propose d'ajouter « y compris la nanométrie » à la dernière phrase (recommande...) du projet de résolution F. M. Chung pense aussi que la nanométrie présente beaucoup d'intérêt, mais dit qu'elle n'est pas encore bien définie : il poursuit des discussions sur ce sujet avec MM. Quinn et Chartier du BIPM, et un groupe de travail sera bientôt créé.

L'opinion des délégués quant à l'opportunité d'inclure explicitement ou pas la nanométrie est très partagée, et la discussion se poursuit lors du vote sur le projet de résolution F. M. Sutton (Nouvelle-Zélande) est d'avis que, puisque la nanométrie est déjà mentionnée explicitement au troisième point du « considérant », il n'est pas nécessaire de la mentionner explicitement au « recommande ». M. Valdés (Argentine) argumente que, puisque de nombreux pays réalisent des étalons en réponse aux résolutions de la Conférence générale, il faut mentionner explicitement la nanométrie. M. Carneiro (Danemark) pense aussi que le fait d'inclure la nanométrie soulignerait qu'il est important de promouvoir ce domaine. M. Molinar (Italie) souligne le fait que la nanométrie est un domaine technique très vaste et qu'il faut consacrer beaucoup d'efforts à la mise au point des instruments. M. Schwitz (Suisse) se demande si la mention d'un domaine spécifique ne risque pas d'exclure les autres. Mme Brown (États-Unis) suggère, plutôt que de changer le « recommande », d'ajouter le mot « inclusivement » au troisième point du « considérant ». M. Charik (Royaume-Uni) est favorable à cette proposition.

M. Blevin clôt la discussion en rappelant aux délégués qu'il incombe aux laboratoires nationaux de métrologie d'interpréter les résolutions de la Conférence générale. Il appelle ensuite au vote sur les deux propositions de changement rédactionnel : la mention explicite de la nanométrie au « recommande », et l'adjonction du terme « inclusivement » au « considérant ». Cette dernière proposition est acceptée et la première est rejetée. Le projet de résolution F modifié est adopté comme Résolution 6 (*voir* page 141) avec une abstention (Espagne).

11.2 Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées

M. K. Iizuka, président du Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM), présente son rapport sur les activités de ce comité ainsi que le projet de résolution G sur la définition du kilogramme (*voir* page 168).

Le CCM s'est réuni deux fois depuis la 20^e Conférence générale, à trois ans d'intervalle ; il a tenu sa 6^e session en mai 1996 et sa 7^e session en mai 1999. Depuis sa création en 1981, le CCM s'est intéressé à l'amélioration des étalons de masse, de masse volumique, de force et de pression. Comme les techniques relatives à ces étalons sont très différentes les unes des autres, les véritables activités scientifiques du CCM sont traitées par les groupes de

travail chargés des grandeurs en question (étalons de masse, masse volumique, force, hautes pressions, moyennes pressions et basses pressions). En conséquence, le rôle du CCM est d'examiner les travaux des groupes de travail et d'étudier les problèmes nouveaux qui ne sont pas traités par les groupes de travail existants. En réponse aux propositions des États membres, le CCM a créé deux groupes de travail supplémentaires depuis 1995. Le premier d'entre eux est le Groupe de travail sur la constante d'Avogadro, dont la création avait déjà été mentionnée lors de la précédente Conférence générale. Le second est le Groupe de travail *ad hoc* sur la dureté, qui a débuté ses activités en 1998. Dans la suite de ce rapport, les activités de chaque groupe de travail, depuis la précédente Conférence générale, sont résumées et accompagnées de remarques complémentaires sur les décisions prises par le CCM lui-même.

Étalons de masse

Après l'achèvement de la troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme par le Bureau international en 1992, le Groupe de travail sur les étalons de masse a organisé une comparaison internationale d'étalons secondaires de 1 kg en acier inoxydable, comparaison préparée par le Bureau international qui en est le laboratoire pilote. Deux étalons en acier inoxydable ont circulé dans quatorze laboratoires nationaux et les mesures sont terminées. Le rapport est en préparation, conformément aux « Directives sur les comparaisons clés du CIPM ». À ce moment-là, le groupe a discuté des comparaisons nécessaires pour assurer l'accord mutuel des étalons de masse dans un domaine plus large et a choisi six valeurs de masses (100 mg, 2 g, 20 g, 500 g, 1 kg et 10 kg) définissant ainsi des comparaisons clés d'étalons de masse. La comparaison clé d'étalons de 1 kg avait déjà commencé sous l'égide du Bureau international, si bien que la comparaison des cinq autres a été organisée par la PTB (Allemagne) qui en est le laboratoire pilote. Cette comparaison clé touche à sa fin. Lors de la 7^e session du CCM en 1999, il a été décidé d'effectuer une comparaison clé d'étalons de 50 kg. On ajoutera aux résultats des comparaisons clés mentionnées ci-dessus ceux des comparaisons régionales dont on dresse actuellement la liste.

En plus des comparaisons clés, le Groupe de travail sur les étalons de masse poursuit ses études sur les effets de la méthode de nettoyage, sur la stabilité des kilogrammes prototypes en platine iridié et des étalons en acier inoxydable, sur la détermination de la masse volumique de l'air ambiant, et sur l'évaluation des propriétés magnétiques des masses.

Le Club sur les balances, dont l'existence n'est pas officielle, a organisé à l'occasion de chaque session du CCM des réunions pour échanger des informations sur les activités en cours dans les laboratoires de métrologie à propos de la mise au point de nouvelles balances. Lors de la dernière réunion, il a traité de la balance prototype à suspensions flexibles du Bureau

international, de l'expérience sur la balance du watt en cours à l'OFMET (Suisse) et d'un certain nombre de recherches menées dans d'autres laboratoires.

Masse volumique

Le travail principal effectué par le Groupe de travail sur la masse volumique a été la préparation de la nouvelle table sur la masse volumique de l'eau pure. Après de longues recherches sur la détermination absolue de la masse volumique et sur le coefficient de dilatation thermique de l'eau pure, le groupe a terminé la rédaction d'une nouvelle table dans le domaine de température situé entre 0 °C et 40 °C. Les autres questions à l'étude ont concerné par exemple une comparaison régionale de mesure de la masse volumique de l'air, la mesure hydrostatique du volume d'objets solides et la détermination absolue de la masse volumique du mercure. En ce qui concerne la comparaison clé d'étalons de masse volumique, il a été décidé de faire circuler des objets en silicium et un groupe de trois laboratoires en prépare le protocole.

Force

Le Groupe de travail sur la force a effectué de nombreuses comparaisons internationales par le passé et il a décidé que les résultats des comparaisons effectuées depuis 1986 soient entrés dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés mise en œuvre dans le cadre du MRA. En ce qui concerne les comparaisons clés du Comité international, le groupe de travail a décidé d'organiser de nouvelles comparaisons de mesures de force dans des domaines allant jusqu'à 10 kN, 100 kN, 1 MN et 4 MN, selon les possibilités des machines étalons de mesure de force des laboratoires participants. Ceux-ci seront divisés en deux groupes. Chaque groupe étalonnera deux capteurs selon un mode opératoire spécifié, mais le premier groupe les étalonnera pour deux valeurs de force alors que le second les étalonnera à une seule. On espère que le nombre de laboratoires participants sera inférieur à dix. La comparaison devrait s'achever en 2003.

En dehors des comparaisons, le groupe échange des informations sur la méthode d'évaluation des incertitudes lors des étalonnages, en particulier pour ceux concernant les systèmes à pyramides de capteurs.

Basses pressions

Depuis sa création en 1991, qui résulte de la fusion des groupes de travail sur les basses et les très basses pressions, ce groupe de travail a préparé des comparaisons dans les domaines situés entre 10^{-7} Pa et 10^{-3} Pa et entre 1 Pa et 1 kPa. Celles-ci ont été identifiées comme comparaisons clés lors de la 6^e session du CCM en 1996. La première de ces comparaisons a débuté en janvier 1999 et consiste à faire circuler trois jauges à ionisation Bayard-

Alpert et deux jauges à rotor tournant entre six laboratoires ; elle devrait s'achever en septembre 2000. La seconde comparaison s'effectue en deux groupes, un groupe de laboratoires européens et un groupe de laboratoires asiatiques ; deux jauges à diaphragme à condensateurs et deux jauges à diaphragme à résonance en silicium fabriquées par micro-usinage sont utilisées en mode absolu ou relatif. Elle devrait s'achever en septembre 1999. En fait, le groupe de travail avait effectué auparavant des comparaisons dans les domaines situés entre 10^{-7} Pa et 10^{-3} Pa et entre 10^{-4} Pa et 1 Pa et en a déjà publié les résultats. Le groupe n'a cependant l'intention d'intégrer à la base de données du BIPM sur les comparaisons clés que les résultats correspondant au second domaine de pression.

Moyennes pressions

En ce qui concerne les moyennes pressions, un certain nombre de laboratoires ont participé aux comparaisons de mesure de pressions dans le domaine situé entre 10 kPa et 140 kPa qui se sont déroulées entre 1983 et 1995. Les résultats ont maintenant été confirmés par chaque laboratoire afin d'être intégrés à la base de données du BIPM sur les comparaisons clés. Le groupe envisage aussi de relier les résultats des comparaisons régionales effectuées sous l'égide de l'APMP et de l'EUROMET aux comparaisons clés mentionnées ci-dessus. En attendant, une nouvelle comparaison clé dans le domaine situé entre 10 kPa et 120 kPa en modes absolu et relatif et où l'on fait circuler une jauge à piston à gaz est en cours. On pense que les mesures seront terminées vers juillet 2000.

Hautes pressions

Ce groupe de travail a aussi effectué une série de comparaisons depuis sa création. Ses activités récentes ont porté principalement sur les deux comparaisons suivantes : 1) comparaison de surfaces effectives calculées en mesurant le diamètre de deux ensembles piston-cylindre et comparaison de mesure de pressions en milieu gazeux et en mode relatif avec les mêmes dispositifs, dans le domaine situé entre 50 kPa et 1 MPa, 2) comparaison en milieu gazeux et en mode relatif dans le domaine situé entre 80 kPa et 7 MPa. Le rapport final de la première comparaison est presque terminé ; le second ne sera disponible qu'au début de l'an 2000. Le groupe de travail a aussi examiné les anciennes comparaisons internationales et régionales ; il a conclu que les résultats de la comparaison de pressions en milieu liquide jusqu'à 100 MPa, qui ont été publiés dans *Metrologia* (1991, **28**, 419-424), pourraient figurer dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés, ainsi que les comparaisons régionales de mesure de pressions en milieu liquide de 0,5 GPa à 1 GPa, si on peut les relier entre elles. Le groupe a aussi confirmé qu'il devrait centrer ses activités sur la nouvelle comparaison clé de mesure de pressions en milieu liquide à 100 MPa.

Activités communes aux groupes de travail sur les pressions

Les trois groupes de travail sur les pressions ont organisé en commun la troisième conférence sur les pressions qui s'est tenue en mai 1999 à Turin. Ils ont aussi organisé des réunions communes à l'occasion des sessions du CCM et discuté du programme à venir de comparaisons clés d'étalons de pressions. En conséquence, ils ont décidé de conserver pour le moment les six comparaisons clés choisies précédemment et d'y ajouter une comparaison de mesure de pressions en milieu gazeux en mode relatif entre 10 kPa et 120 MPa et une comparaison de mesure de pressions en milieu huileux en mode relatif entre 10 MPa et 100 MPa ; les deux ont été approuvées par le CCM.

En dehors des activités liées aux comparaisons clés, le CCM a adopté une déclaration mettant en garde contre l'utilisation de facteurs de conversion d'une précision excessive pour les unités de pression, compte tenu des incertitudes sur la masse volumique des liquides utilisés pour les manomètres et de la valeur de l'accélération due à la pesanteur.

La constante d'Avogadro et une éventuelle redéfinition du kilogramme

La détermination de la constante d'Avogadro est nécessaire pour améliorer l'exactitude de la table des constantes fondamentales. Elle pourrait aussi contribuer à une nouvelle définition du kilogramme, qui ne serait plus à l'avenir fondée sur un kilogramme prototype. Le Groupe de travail sur la constante d'Avogadro, créé en tant que Groupe de travail *ad hoc* en 1994, se réunit maintenant chaque année en qualité de groupe de travail du CCM.

Depuis la précédente Conférence générale, le groupe a fait de gros efforts pour identifier les problèmes à résoudre afin de réduire l'incertitude relative à un niveau proche de 10^{-8} . Il a été confirmé que les incertitudes relatives sur les mesures de masse volumique et d'espacement réticulaire de monocristaux de silicium sont maintenant réduites à 10^{-8} environ. Le principal obstacle qui reste à vaincre semble être lié à la différence entre les masses molaires de divers monocristaux de silicium, bien que ceci ne soit pas encore confirmé. L'incertitude due à ce facteur et à d'autres problèmes entrant dans la redétermination de la constante seront étudiés lors de la réunion du groupe de travail en septembre 1999.

Outre la détermination de la constante d'Avogadro, d'autres moyens potentiels pour contrôler la stabilité du prototype international du kilogramme sont étudiés par un groupe de travail du CCEM. Comme les progrès réalisés dans la mise au point de ces méthodes préoccupent beaucoup le CCM, il a décidé de proposer à la Conférence générale le projet de résolution G (voir page 168) afin d'encourager les laboratoires nationaux à poursuivre leurs efforts pour affiner les expériences qui relient l'unité de masse à des

constantes fondamentales ou atomiques, en vue d'une nouvelle définition du kilogramme.

Dureté

La dureté d'un matériau est définie de manière empirique, par référence à des méthodes d'essai spécifiques. Ainsi, le degré de dureté, même s'il a une signification physique précise, est exprimé par un nombre conventionnel, qui n'est pas nécessairement fondé sur l'application d'une loi qui relèverait strictement de la physique. Toutefois, dans le domaine de l'ingénierie, la dureté est d'une grande importance pour le contrôle de qualité et la traçabilité des étalons de dureté est déjà établie dans chaque pays. Comme la demande de traçabilité internationale est forte et comme des étalons de dureté sont conservés dans de nombreux laboratoires nationaux de métrologie, le Comité international a décidé d'entreprendre une comparaison internationale d'étalons de dureté en collaboration avec des organisations internationales telles que l'IMEKO/TC 5, l'ISO/TC 164/SC 3 et l'OIML/TC 10/SC 5. Il a donc créé un Groupe de travail *ad hoc* sur la dureté en 1998, qui comprend parmi ses membres des représentants des organisations mentionnées ci-dessus.

Suite à un questionnaire rédigé par ce groupe, de nombreux laboratoires nationaux de métrologie ont exprimé leur intérêt pour une comparaison internationale d'étalons de dureté dont le degré serait repéré sur l'échelle de Rockwell, de Vickers ou de Brinell. Il s'ensuit que le groupe a décidé d'organiser des comparaisons de ces étalons d'échelles de dureté. Certains travaux ont déjà été réalisés par l'ISO/TC 164/SC 3 sur des étalons de dureté à pénétrateur conique dont le degré de dureté est repéré sur l'échelle de Rockwell ; le groupe recherchera quels sont les résultats disponibles pour la base de données du BIPM sur les comparaisons clés. En même temps, il préparera une comparaison permettant de tester des pénétrateurs coniques de Rockwell et une comparaison d'étalons de dureté utilisant l'échelle de Vickers.

M. Bordé remercie M. Iizuka pour la présentation de son rapport et ouvre la discussion sur les meilleures orientations pour les activités à venir, compte tenu des possibilités nouvelles, et leurs conséquences pour le BIPM. Il évoque tout d'abord la constante d'Avogadro, N_A , et demande s'il serait possible de produire des cristaux de silicium sphériques sans défaut. M. Iizuka répond que les résultats des déterminations récentes de N_A au moyen d'une sphère en silicium diffèrent entre eux de 3×10^{-6} en valeur relative. La qualité de l'échantillon de cristal utilisé affecte la mesure de la masse molaire et volumique. Le Groupe de travail du CCM sur la constante d'Avogadro avait pensé au début que l'origine de la différence entre les mesures de masse molaire obtenues à l'IRMM et dans le laboratoire de

Beijing provenaient de la qualité du cristal. Mais les deux laboratoires avaient mesuré le même cristal, la différence doit donc provenir de leur méthode de mesure respective. La qualité du cristal est aussi un point important, et le groupe de travail a décidé de répéter une série de mesures avec un ensemble commun de cristaux. M. Iizuka espère que cette méthode donnera une valeur plus exacte de la constante d'Avogadro.

M. Bordé s'enquiert ensuite des méthodes de mesure de la masse atomique, mentionnant l'expérience en chute libre à Stanford et les expériences sur la balance du watt au NIST, au NPL et à l'OFMET. M. Iizuka répond que les progrès récents de la balance du watt à bobine mobile ont abouti à une proposition de MM. Taylor et Morr (NIST) de redéfinir le kilogramme en termes d'une masse atomique, et que la balance du watt promet d'offrir une méthode stable de contrôle. M. Quinn estime aussi que la balance du watt semble plus prometteuse que la méthode de la sphère en silicium pour une future redéfinition du kilogramme, et commente que le BIPM pourrait aussi être intéressé à commencer une activité dans ce domaine. La méthode de la balance du watt implique seulement qu'on équilibre les forces gravitationnelle et électromagnétique, selon la méthode de Kibble, et devrait, en principe, donner une incertitude relative de l'ordre de 10^{-9} . Par comparaison, la méthode de la sphère en silicium conduit à des difficultés qui deviennent vite ingérables dès qu'on s'approche du niveau de plusieurs 10^{-8} : cette méthode fait appel à la mesure de la masse molaire (que seul l'IRMM est en mesure de réaliser actuellement, l'institut chinois ne pouvant mesurer que la masse molaire relative), à la mesure de la quantité de matière volumique (plus complexe en raison de la couche d'oxyde de silicium), à la détermination des défauts du cristal et de la constante du réseau, de même qu'à une fabrication d'une très grande exactitude et à des mesures relevant de la métrologie dimensionnelle.

M. Göbel (Allemagne) pense aussi que la méthode de la balance du watt est la plus prometteuse, mais ajoute qu'il n'est pas aussi pessimiste au sujet de la méthode de la sphère en silicium. Il note que la couche d'oxyde de silicium pourrait être préparée de façon à ce que son épaisseur soit connue, et il mentionne une autre approche possible pour mesurer la masse molaire, méthode fondée sur une émission de neutrons rapides.

M. Schwitz (Suisse) présente l'expérience de balance du watt à l'OFMET, disant que l'OFMET espère obtenir des résultats avec une incertitude relative de 1×10^{-8} en 2000 ou en 2001. M. Blevin répond que le programme suisse est extrêmement important. Une définition du kilogramme fondée sur la méthode de la balance du watt ne pourra pas rivaliser avec l'étalon du kilogramme actuel si la méthode est trop compliquée ou si l'équipement n'existe que dans un ou deux laboratoires. Une telle situation serait trop précaire, et cette activité pourrait disparaître complètement à la suite d'un changement dans la stratégie de gestion des laboratoires en question.

Le projet de résolution G est mis au vote et adopté à l'unanimité comme Résolution 7 (*voir* page 141).

11.3 Comité consultatif du temps et des fréquences

M. S. Leschiutta, président du Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF), précédemment dénommé Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS), présente son rapport ainsi que le projet de résolution H sur les étalons primaires de fréquence opérationnels (*voir* page 169).

Ce rapport reflète les principales activités de la section du temps du BIPM, du CCTF, et de ses laboratoires membres, pendant la période 1995-1999. Ce rapport mentionne aussi certains aspects du rôle nouveau et parfois inattendu joué dans la société d'aujourd'hui par les équipements et méthodes utilisés pour la mesure du temps et des fréquences.

Il couvre les points suivants : la seconde et le TAI, les étalons primaires de fréquence, la formation des échelles de temps et l'établissement du TAI, l'avenir de l'UTC, les comparaisons entre des horloges distantes, les échelles de temps appliquées à des fins technologiques, les nouveaux usages des références temporelles et quelques événements relatifs à la métrologie du temps et des fréquences.

La seconde et le Temps atomique international

Les étalons primaires de fréquence, mis au point dans les laboratoires nationaux de métrologie et dans d'autres laboratoires de temps, contribuent à la création d'un intervalle de temps de durée aussi proche que possible de la seconde du SI. Cependant, il faut disséminer cette « seconde » et donner des informations sur la « date ». Ces deux derniers objectifs sont réalisés grâce à l'élaboration d'une échelle de temps fondée sur des données d'horloges et pilotée selon les résultats des étalons de fréquence. Les laboratoires nationaux de métrologie sont chargés d'obtenir, au moyen d'expériences de physique, les meilleures réalisations possibles de la seconde du SI et aussi d'établir des échelles de temps locales.

Le Bureau international a, quant à lui, pour mission d'élaborer une échelle de temps de référence mondiale appelée TAI, fondée sur l'ensemble des données des horloges des laboratoires de temps. L'objectif de la section du temps du Bureau international est donc de construire le TAI de telle façon qu'il délivre un intervalle unitaire de temps le plus exact possible et qu'il présente la meilleure stabilité à long terme réalisable. De plus, le TAI doit être très largement accessible.

Ces objectifs ont été atteints avec un succès reconnu, ceci en grande partie grâce à Mme Claudine Thomas qui a dirigé la section du temps du Bureau

international pendant huit ans. Depuis la 13^e session du CCDS, Mme Thomas s'est vue confier la responsabilité de la base de données du BIPM sur les comparaisons clés, qui est au centre du tout nouvel arrangement de reconnaissance mutuelle entre les laboratoires nationaux de métrologie.

Mme Elisa Felicitas Arias, qui est actuellement directeur de l'Observatoire naval de Buenos Aires et professeur d'astronomie à l'université de La Plata, prendra en charge la responsabilité de la section du temps en novembre 1999. M. Gérard Petit, membre du personnel du Bureau international dans cette section, en est en ce moment responsable par intérim.

Étalons primaires de fréquence

Le nombre restreint d'étalons primaires de fréquence que l'on met au point et que l'on évalue dans les laboratoires nationaux de métrologie est un motif de préoccupation que le CCDS, le CCTF et le Comité international ont exprimé à plusieurs reprises dans le passé. Pendant environ dix ans, jusqu'en 1995, l'exactitude du TAI était fondée sur deux horloges primaires de la PTB (Allemagne). La situation s'est améliorée à l'époque de la précédente Conférence générale, du fait de la mise en service au NIST (États-Unis) d'un nouvel étalon de fréquence à pompage optique, dont l'exactitude était alors caractérisée par une incertitude relative de 1×10^{-14} , comparable à celle des deux horloges de la PTB. D'autres étalons à césium « classiques », c'est-à-dire à faisceaux d'atomes thermiques, étaient alors en cours de mise au point, à des stades différents, avec une incertitude relative de l'ordre de 10^{-13} .

De plus, le CCDS a toujours recommandé d'essayer d'autres configurations pour repousser les limites des systèmes de conception classique et ainsi déceler d'éventuels effets systématiques encore non observés. Une brèche a été ouverte par l'ENS et par le BNM-LPTF (France), tous les deux situés à Paris : une idée ancienne – observer des atomes en chute libre – a été reprise et a conduit à mettre au point une « fontaine » d'atomes de césium froids. L'incertitude relative de la seconde du SI produite par ce dispositif est de $1,4 \times 10^{-15}$, valeur présentée à la 14^e session du CCTF et susceptible d'être améliorée à l'avenir.

En 1999, la situation s'est nettement améliorée, du moins en ce qui concerne le nombre de recherches effectuées dans les laboratoires nationaux de métrologie sur les différents dispositifs à césium, comme le montre le tableau suivant qui indique le nombre de projets en cours dans quatorze laboratoires.

Étalons primaires de fréquence à césium					
Faisceau thermique, préparation et détection magnétiques	Faisceau thermique, pompage optique	Fontaine d'atomes froids	Faisceau d'atomes lents	Champ fort	Maser
4	3	15	3	1	1

Plusieurs laboratoires étudient des étalons de fréquence fondés sur des transitions d'autres atomes (calcium, magnésium, mercure, ytterbium) et un certain nombre de fontaines d'atomes froids associant césium et rubidium sont actuellement à l'essai.

Certaines de ces fontaines à césium devraient être évaluées au cours des prochaines années. Il est bon de rappeler qu'un étalon primaire de fréquence est un instrument très complexe, que peu de laboratoires disposent des compétences requises pour les concevoir et les mettre au point, et qu'il faut prévoir une période d'apprentissage. L'expérience montre que la fabrication d'un étalon primaire fondé sur les techniques les plus modernes demande aux chercheurs qualification et dévouement, et qu'il faut près de dix ans pour aboutir.

Si les progrès réalisés dans la mise au point d'étalons primaires sont très satisfaisants, il ne faut pas oublier que l'objectif final est de les utiliser pour maintenir et améliorer l'exactitude du TAI. Cela implique de maintenir les étalons primaires de fréquence en état de fonctionnement pendant de nombreuses années. Les laboratoires nationaux de métrologie doivent donc consacrer des ressources considérables à cette mission et le projet de résolution H (*voir* page 169) présenté à cette conférence a pour objet de demander un tel effort.

Néanmoins, quatre autres problèmes au moins se posent pour profiter pleinement de ces dispositifs qui délivrent des réalisations de la seconde du SI avec une incertitude relative meilleure que 10^{-14} , voire même proche de 10^{-16} : évaluer les effets du corps noir ambiant, tenir compte de la théorie de la relativité générale, exprimer convenablement les incertitudes impliquées dans l'évaluation des étalons primaires de fréquence et, à plus longue échéance, peut-être penser à une nouvelle définition de la seconde du SI.

Deux laboratoires, la PTB et le BNM-LPTF, ont effectué des recherches sur les effets du corps noir, suite à la Recommandation S 2 (1996) de la 13^e session du CCDS. La PTB a mesuré un décalage relatif de fréquence de $-17,9 \times 10^{-15}$, avec une incertitude-type de $1,6 \times 10^{-15}$, pour le rayonnement d'un corps noir à 300 K. Ces valeurs sont en bon accord avec la valeur du décalage relatif prévu par la théorie, $-16,9 \times 10^{-15}$. Des résultats similaires ont été obtenus au BNM-LPTF.

Un Comité mixte sur les systèmes de référence spatio-temporels et la métrologie dans le cadre de la relativité générale a été créé en 1997, à l'instigation du Bureau international et de l'UAI, pour étudier les problèmes liés à la théorie de la relativité générale. Un rapport sur les études terminées et en cours a été présenté par son président, M. G. Petit du Bureau international, lors de la 14^e session du CCTF en 1999. Un résumé figure dans le rapport de cette session. Le CCTF a aussi demandé à M. G. Petit de suivre les activités de l'UAI, de l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI), et des autres organisations concernées par ce sujet, et d'en tenir le CCTF informé.

La question de l'expression des incertitudes des étalons primaires de fréquence sera discutée dans le paragraphe suivant.

À propos d'une éventuelle nouvelle définition de la seconde du SI, les participants à la 14^e session du CCTF se sont accordés pour reconnaître l'extraordinaire vitalité de la définition actuelle : elle a le mérite d'être simple et a permis, en quarante ans, de passer d'une incertitude relative de 10^{-9} avec le dispositif d'Essen en 1955 à 10^{-16} , valeur qui semble maintenant accessible à bord de satellites (il est envisagé de placer une horloge à atomes froids sur la Station spatiale internationale).

Le CCTF a décidé aussi de proposer au Comité international la Recommandation S 1 (1999) sur la mise en pratique de la définition de la seconde, afin d'apporter plus de précision à cette définition pour ceux qui conçoivent et mettent en place des dispositifs qui délivrent des réalisations primaires de la seconde. Cette recommandation stipule que les mesures doivent être corrigées pour tenir compte de la vitesse des atomes par rapport au système de référence de l'horloge, des champs électriques et magnétiques, y compris ceux dus au rayonnement du corps noir ambiant, des effets d'échange de spin et des autres perturbations éventuelles.

Expression des incertitudes des étalons primaires de fréquence

Lors de la session de 1996 du CCDS, une discussion a eu lieu sur la façon d'appliquer le GUM à la mesure des étalons de fréquence. Un groupe de travail, présidé par M. R. Douglas, a étudié soigneusement cette question et a décidé de concentrer ses activités sur la question de l'expression des incertitudes des comparaisons mettant en jeu des étalons primaires de fréquence, qui sont au sommet de la chaîne de traçabilité de fréquence. Lors de la session de 1999 du CCTF, d'autres discussions ont abouti aux Recommandations S 2 (1999) et S 3 (1999) qui concernent l'expression des incertitudes des étalons primaires de fréquence et aussi les incertitudes associées aux comparaisons d'étalons primaires de fréquence.

L'esprit de ces deux recommandations est de suivre le GUM, lorsqu'il est approprié, et de donner dans les publications suffisamment de détails sur le calcul des incertitudes afin que ce soit compréhensible de tous les utilisateurs

et aussi, si nécessaire, de permettre à l'utilisateur final de réviser ce calcul à posteriori sur la base de nouvelles informations ou d'une meilleure compréhension.

Formation des échelles de temps, établissement du TAI

Comme je l'ai souligné précédemment, l'établissement du TAI est la principale fonction de la section du temps du Bureau international. Un certain nombre de perfectionnements ont été apportés ces dernières années, comme la réduction de l'intervalle de calcul du TAI (données traitées sur des périodes d'un mois au lieu de deux), un accès plus fréquent au TAI (tous les cinq jours au lieu de dix), et un changement de la méthode de pondération pour améliorer la discrimination entre les meilleures horloges participant au TAI.

En conséquence, la stabilité de la fréquence moyenne relative du TAI s'est améliorée ; l'écart-type d'Allan correspondant a été réduit de $2,6 \times 10^{-15}$ en 1995 (sur une durée de moyenne de quarante jours) à 6×10^{-16} (sur une durée de moyenne de vingt à quarante jours) pendant la période de 1998 à 1999. En ce qui concerne l'exactitude du TAI, la durée de l'intervalle unitaire de l'échelle a été estimée à $(1 - 0,4 \times 10^{-14})$ s, avec une incertitude-type relative de $0,4 \times 10^{-14}$, au début de 1999.

Le choix et la mise en pratique d'un algorithme pour l'établissement d'une échelle de temps est une procédure plus complexe que l'on ne l'imagine et qui dépend beaucoup de ce que l'on attend de l'échelle de temps en question, des caractéristiques des horloges sur lesquelles elle est fondée et des méthodes de comparaison d'horloges. Ces problèmes ont été traités par le Groupe de travail du CCTF sur le TAI présidé par M. Pâquet.

Comme plusieurs laboratoires ont élaboré leur propre algorithme pour le calcul de leur échelle de temps nationale, le CCTF considère le moment venu, puisque l'on dispose des compétences nécessaires, de créer sous l'égide du Groupe de travail sur le TAI un sous-groupe chargé de la formation des échelles de temps. Les missions de ce sous-groupe ont été approuvées et le Bureau international participera à ses activités.

Temps universel coordonné UTC

Il y a environ trente ans, l'UTC, tel que nous le connaissons aujourd'hui, a été proposé et mis en place par l'Union internationale des télécommunications (UIT), par l'intermédiaire de la Commission 7 (Étalons de fréquence et signaux horaires) du Comité consultatif international des radiocommunications (CCIR).

La principale caractéristique de l'UTC est qu'il n'est pas uniforme à cause de la présence de secondes intercalaires, introduites une à une tous les un à deux

ans, pour tenir compte du ralentissement de la rotation de la Terre. Ceci a permis de parvenir à un compromis entre deux communautés d'utilisateurs du temps. La première est constituée de physiciens, d'ingénieurs et de certains astronomes, qui ont besoin d'une échelle de temps uniforme, et qui fondent en conséquence leurs activités sur le TAI. La seconde comprend des utilisateurs de la navigation et de la géodésie et aussi certains astronomes. Pour ces derniers utilisateurs, les signaux horaires doivent aussi préserver l'information sur la position angulaire de la Terre.

Le compromis est le suivant : une seconde intercalaire est introduite avant que la différence entre l'UTC et l'UT1 (une échelle de temps astronomique dynamique qui représente approximativement la position angulaire de la Terre) n'atteigne 0,9 s. Au cours de la période 1972-1999, 22 secondes intercalaires ont été introduites.

L'adoption officielle de l'UTC avait été faite après consultation de l'Association internationale de signalisation maritime (AISM), du Bureau international de l'heure* (BIH), de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), de l'Organisation maritime internationale (OMI), de l'UAI, de l'UGGI, de l'Union radioscopique internationale (URSI) et d'autres organisations concernées.

La situation a profondément changé avec l'introduction de systèmes de navigation par satellite fondés sur des horloges atomiques, si bien qu'à l'heure actuelle la perpétuation de l'UTC et plus encore des secondes intercalaires est remise en question. Ce problème a été discuté lors de la session d'avril 1999 du CCTF et plusieurs options ont été présentées ; il a été demandé au directeur du Bureau international de soulever ce problème dans une lettre adressée à tous les organismes concernés, en recommandant en même temps d'utiliser le TAI quand on a besoin d'une échelle de temps sans discontinuité.

Comparaison et dissémination des échelles de temps

Les laboratoires nationaux de métrologie disséminent directement leurs échelles de temps locales selon diverses méthodes et à des niveaux divers. Le Bureau international et les laboratoires nationaux de métrologie réalisent aussi des comparaisons horaires de la plus haute exactitude et de la plus haute précision, dans le but d'étudier les étalons de fréquence et d'utiliser les mesures de comparaison d'horloges distantes pour l'établissement du TAI.

* Les attributions de l'ancien BIH ont été transférées en partie à la Section du temps du Bureau international pour l'établissement des échelles de temps internationales, et en partie au Service international de la rotation terrestre (IERS) pour les questions relatives à la rotation de la Terre ; par exemple, les décisions relatives au nombre et à la date d'introduction des secondes intercalaires sont du ressort de l'IERS.

À l'heure actuelle, aucune méthode de comparaison n'est suffisamment exacte pour comparer la fréquence des meilleurs étalons primaires dans des laboratoires distants, compte tenu de leurs performances individuelles. En effet, de telles comparaisons ne peuvent qu'utiliser les données de temps des horloges commerciales auxquels ils sont comparés localement.

Les comparaisons d'horloges jouent assurément un rôle fondamental dans les activités du Bureau international. Aussi le personnel de la section du temps doit-il posséder une connaissance théorique et pratique des méthodes existantes et nouvellement proposées pour comparer des horloges distantes. Ceci est essentiel car c'est le seul moyen de déceler les erreurs systématiques inhérentes à toute méthode ou technique.

Durant la période de quatre ans couverte par ce rapport, les trois questions principales qui ont été étudiées sont les suivantes : la consolidation des acquis à propos de l'utilisation de codes horaires fondés sur des horloges atomiques embarquées à bord de satellites de navigation, la reconnaissance des applications possibles dans le domaine du temps de la méthode utilisant des liaisons par aller et retour, en hyperfréquences, avec des satellites de communication et l'introduction d'une approche fondée sur le signal des porteuses émises par les satellites de navigation.

Codes horaires émis par les satellites du GPS et du GLONASS

Les comparaisons d'horloges faisant appel aux codes horaires émis par le GPS forment toujours le pivot de l'établissement du TAI. Environ cinquante laboratoires de temps observent les satellites selon des programmes établis de façon régulière par le Bureau international pour chacune des différentes régions du globe. La technique mise en œuvre est celle dite des « observations simultanées », selon laquelle plusieurs laboratoires observent le même satellite au même moment. Cette manière de procéder élimine, ou compense en partie, un certain nombre de causes d'erreurs, y compris la dégradation intentionnelle de l'exactitude introduite pour des raisons militaires.

La pratique régulière et étendue de cette méthode a permis d'identifier d'autres causes d'erreurs, telles que les effets thermiques sur les câbles et les antennes et certaines bizarreries insoupçonnées dans les retards internes des récepteurs. Le Bureau international a lui-même effectué des études sur les effets thermiques et fait circuler un récepteur pour suivre les variations des retards internes des récepteurs utilisés dans les divers laboratoires nationaux de métrologie.

L'utilisation des satellites du GLONASS présente des avantages potentiels, aucune dégradation intentionnelle des performances n'étant introduite. Cependant, il faut malgré tout résoudre quelques problèmes, tel que le nombre restreint des récepteurs capables d'observer les satellites du GLONASS ou simultanément ceux du GPS et du GLONASS.

Le CCDS avait établi un sous-groupe de travail sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS et le GLONASS ; les conclusions et recommandations de ce groupe figurent dans le rapport de la 14^e session du CCTF (1999).

Pour résumer, dans les meilleures conditions expérimentales, même en étalonnant les retards internes des récepteurs, l'incertitude sur une mesure de comparaison d'horloges se situe, à l'heure actuelle, entre 1 ns et 3 ns, incertitude multipliée par un facteur 2 ou 3 si l'étalonnage des récepteurs n'est pas effectué.

À tous les niveaux, les problèmes inhérents à certains équipements anciens et toujours en service dans les laboratoires pourraient être en partie résolus par la mise en œuvre des nouveaux récepteurs du temps du GPS et du GLONASS à canaux multiples et multicode. Le CCTF a donc décidé, lors de sa session de 1999, de soumettre au Comité international la Recommandation S 4 (1999) dans laquelle il propose d'entreprendre les études nécessaires sur l'utilisation de tels récepteurs, en particulier pour l'établissement du TAI.

Comparaisons d'horloges utilisant des liaisons par aller et retour avec des satellites de communication

Les comparaisons de temps et de fréquence utilisant des liaisons par aller et retour avec des satellites de communication sont par certains côtés intéressantes. En adoptant une approche par aller et retour, on élimine ou on réduit certaines des composantes du bilan d'incertitude ; par exemple, moyennant certaines hypothèses, il n'est pas nécessaire de connaître la position exacte du satellite. L'équipement n'est pas trop coûteux et peut être installé au même endroit que les horloges à comparer. Enfin, cette méthode fournit une précision potentielle remarquable (mais pas l'exactitude) puisque le niveau de bruit sur une mesure de comparaison est, dans des conditions normales de fonctionnement, d'environ 1/100^e de la période du code. Quand la liaison est bien contrôlée, comme c'est le cas entre l'université technique de Graz (TUG, Autriche) et le NMi Van Swinden Laboratorium (VSL, Pays-Bas), on observe un écart-type des mesures de 200 ps pour des moyennes d'une heure et des variations crête-à-croix d'environ 1 ns sur deux ans.

Le CCDS avait établi en 1993 un Groupe de travail sur les comparaisons de temps et de fréquence par aller et retour sur satellite. Celui-ci s'est réuni quatre fois entre 1996 et 1999 pour traiter d'un certain nombre de questions et organiser des recherches et des expériences. Les conclusions et recommandations de ce groupe figurent dans le rapport de la 14^e session du CCTF (1999).

Pour résumer, cette technique est au point et s'est montrée, depuis trois ans, tout à fait opérationnelle. Elle est mise en œuvre dans une vingtaine de laboratoires de temps et offre des performances comparables à celles de la

technique des observations simultanées du GPS (actuellement la seule méthode de comparaison de temps utilisée pour l'établissement du TAI), avec l'avantage supplémentaire d'en être complètement indépendante.

C'est pourquoi le CCTF a décidé lors de sa dernière session de soumettre au Comité international la Recommandation S 7 (1999) dans laquelle il demande d'entreprendre les études nécessaires à l'incorporation des données des comparaisons par aller et retour sur satellite dans le TAI.

Techniques utilisant le signal des porteuses émises par les satellites de navigation pour les comparaisons d'horloges

La nouveauté consiste à comparer des horloges placées sur des satellites et dans des stations terrestres en utilisant la phase du signal des porteuses au lieu du code. La précision des comparaisons est impressionnante, l'écart-type d'une mesure est voisin de 10 ps. Il est difficile de transformer la précision des mesures de phase en exactitude de comparaison de temps ; toutefois, cela devrait permettre d'effectuer des comparaisons de fréquence avec une exactitude sans précédent.

À l'instigation de l'International GPS Service (IGS) un projet pilote commun à l'IGS et au BIPM a été élaboré en 1997. Il a été mené très activement et a abouti aux conclusions présentées pendant la 14^e session du CCTF en avril 1999. Environ vingt-cinq groupes de recherche participent à ce projet pilote, la moitié étant des laboratoires de temps. Le traitement des données de phase du GPS permet d'obtenir un grand nombre d'informations sur les orbites précises des satellites, les données des horloges à bord et sur terre, les coordonnées des antennes réceptrices et les corrections ionosphériques.

Cette technique a un potentiel intéressant et doit être étudiée à fond en vue de l'appliquer aux comparaisons de temps et de fréquences. C'est pourquoi le CCTF a décidé, lors de sa dernière session, de soumettre au Comité international la Recommandation S 5 (1999) qui soutient le projet pilote commun IGS/BIPM et qui recommande un certain nombre d'actions.

Autres échelles de temps appliquées à la technologie

Certains systèmes de satellites sont actuellement en cours de mise en place, en vue d'étendre l'utilisation des systèmes existants tels que le GPS ou le GLONASS (par exemple aux services de l'aviation civile) et de concevoir d'autres systèmes de navigation. Les caractéristiques communes à tous ces nouveaux systèmes sont l'utilisation d'horloges atomiques (on envisage d'en utiliser quelques centaines) et la construction d'échelles de temps dédiées à leur usage. De même, mais dans une moindre mesure, des progrès sont effectués dans le domaine des télécommunications.

Tous les systèmes globaux de navigation par satellite sont potentiellement des sources d'information de temps et sont, par-là même, intéressants, mais ceci doit être étudié avec soin parce qu'une prolifération incontrôlée ou non organisée de tels systèmes pourrait être source d'ambiguïté.

L'ancien CCDS avait donné dans sa Recommandation S 4 (1996) un certain nombre de directives que les systèmes du GPS et du GLONASS suivent maintenant. Le CCTF a décidé, lors de sa dernière session, d'exprimer à nouveau sa préoccupation à ce sujet, en présentant au Comité international un certain nombre de directives dans sa Recommandation S 6 (1999), et a demandé au directeur du Bureau international d'entrer en contact avec les organisations qui font la promotion des systèmes mentionnés ci-dessus.

Nouvelles utilisations des références de temps

La diffusion de nouveaux réseaux de communication nationaux et internationaux qui permettent d'accéder au moyen d'ordinateurs personnels à d'autres ordinateurs ou services, pose un certain nombre de problèmes qui relèvent d'une certaine manière de la métrologie légale, mais qui concernent aussi les laboratoires nationaux de métrologie et indirectement le Bureau international.

Ce type de problèmes vient de l'usage accru de ce qu'on appelle le « commerce électronique » et des investissements en bourse par le biais d'ordinateurs personnels. Le problème à résoudre est de « marquer », « d'estampiller », c'est-à-dire de « dater », le moment de la transaction ; habituellement une incertitude de l'ordre de la seconde est considérée comme suffisante. Par conséquent, le problème n'est pas d'ordre scientifique ou technique, mais d'ordre légal ou commercial. Dans certains pays, les organisations commerciales offrent ce genre de services avec une sorte « d'accès sélectif » plus une protection cryptographique, et demandent une traçabilité à partir des laboratoires de temps ou font directement référence au système de navigation par satellite GPS.

Questions diverses relatives à la métrologie du temps et des fréquences

La mise en pratique du MRA qui pourrait être signé lors de la présente Conférence générale implique le choix et l'organisation d'un grand nombre de comparaisons clés. Les résultats de chaque comparaison clé doivent être approuvés par le Comité consultatif concerné avant d'être inclus dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés. Cette question a été discutée lors de la session du CCTF d'avril 1999.

En 1996, le CCDS avait estimé que l'établissement et la dissémination du TAI et de l'UTC, tels que nous les connaissons aujourd'hui, répondaient aux besoins majeurs des comparaisons d'horloges et qu'ils étaient globalement en accord avec les « Directives pour les comparaisons clés du CIPM ». Le

CCTF ne propose donc pas de comparaisons clés de ce type. Cependant, cette décision ne tient pas compte du problème posé par les comparaisons de fréquence, aussi le CCTF a-t-il décidé, lors de sa dernière session, qu'il est nécessaire de mettre en place des comparaisons clés dans le domaine des fréquences. Il reste néanmoins un certain nombre de questions à résoudre, comme le choix des comparaisons clés. De plus, il n'existe pas de protocole approuvé par tous, en ce qui concerne les incertitudes mentionnées dans les certificats d'étalonnage dans le domaine du temps et des fréquences. Pour étudier les problèmes de ce type, le CCTF a décidé de créer un groupe de travail *ad hoc*, présidé par M. G. de Jong, chargé d'étudier les conséquences, pour le CCTF, du système de comparaisons clés lié au MRA et de recommander des actions appropriées.

M. Leschiutta donne ensuite lecture de la Recommandation 1 (CI-1999) sur les futurs systèmes satellitaires de navigation à couverture globale :

Le Comité international des poids et mesures,

considérant

- que le Comité international a déjà recommandé que « les temps de référence (modulo 1 seconde) des systèmes satellitaires de navigation à couverture globale soient synchronisés aussi étroitement que possible avec l'UTC » et que le repère de référence de ces systèmes soit conforme à l'ITRF, Recommandation 1 (CI-1996),
- que les systèmes GPS et GLONASS suivent déjà ces instructions,
- que ces systèmes sont maintenant largement utilisés pour les comparaisons de temps et de fréquences,

recommande

- que tous les systèmes satellitaires de navigation à couverture globale soient conçus de telle façon qu'il soit possible d'utiliser leurs signaux pour les comparaisons de temps et de fréquences,
- que ces systèmes diffusent en plus de leur temps spécifique (ST) :
 1. la différence entre ST et une réalisation en temps réel de l'UTC et du TAI,
 2. une prévision des différences de temps entre ST, TAI et UTC,
- que les fabricants étudient des récepteurs et des systèmes de traitement spécifiquement conçus pour servir aux comparaisons de temps et de fréquences.

M. Kovalevsky rappelle que cette Recommandation est distribuée seulement à titre d'information ; elle a été adoptée par le Comité international lors de sa 88^e session, la semaine précédente, et ne peut être soumise au vote de la présente Conférence générale. Tous les projets de résolutions soumis au vote doivent être distribués au moins six mois avant la Conférence générale.

M. Bordé remercie M. Leschiutta pour la présentation de son rapport et demande s'il y a des questions. M. Schwitz (Suisse) demande combien d'horloges de nouvelle génération sont en service et combien contribuent au TAI. M. Leschiutta répond que vingt-sept horloges de nouvelle génération sont en construction, mais qu'aucune n'est opérationnelle. Il espère que deux à quatre d'entre elles pourront servir d'étalons de fréquence, mais pas d'horloges, avant la fin de 1999. Il anticipe une incertitude relative initiale de l'ordre de 10^{-14} , mais il devrait être possible d'atteindre 10^{-15} , et peut-être même 10^{-16} . La poursuite de cette étude est très importante.

M. Bordé note que le BNM-LPTF (France) a mis au point une horloge transportable dont l'incertitude relative est de 10^{-15} . C'est la première fois que l'on a la possibilité de transporter une horloge d'une telle exactitude pour une comparaison directe avec une autre horloge, et il suggère que cette expérience pourrait être considérée comme une étude préliminaire à la comparaison clé d'étalons de fréquence au niveau de 10^{-15} voire mieux. Il attire ensuite l'attention sur le projet PHARAO (un étalon de fréquence dans l'espace utilisant des atomes refroidis) en tant que moyen de comparaison d'horloges réparties partout dans le monde, et suggère que l'utilisation de ces résultats pourrait réduire l'incertitude relative du TAI de 10^{-15} à 10^{-16} . Il remarque qu'il est aussi essentiel d'avoir de bons oscillateurs locaux. La mise au point d'horloges cryogéniques de la plus haute pureté spectrale possible est très importante.

M. Leschiutta pense aussi que la mise en œuvre d'horloges de la plus haute pureté spectrale possible est importante, puisque leur stabilité à court terme très élevée devrait permettre d'effectuer des recherches sur la stabilité des constantes fondamentales. Il ajoute que beaucoup d'efforts sont consacrés à la mise au point d'horloges de différents types.

Le projet de résolution H est approuvé à l'unanimité comme Résolution 8 (voir page 142).

11.4 Comité consultatif d'électricité et magnétisme

M. E.O. Göbel, président du Comité consultatif d'électricité et magnétisme (CCEM), appelé précédemment le Comité consultatif d'électricité (CCE), présente le rapport suivant.

Depuis la précédente Conférence générale le CCEM s'est réuni une fois, en juin 1997. Il a discuté des questions relatives aux constantes fondamentales et au SI, ainsi que des travaux sur l'utilisation de mesures électriques pour contrôler la stabilité du prototype international du kilogramme et de l'état d'avancement de l'ajustement des valeurs des constantes fondamentales par la méthode des moindres carrés. Le CCEM s'est intéressé en particulier à l'amélioration de la connaissance de K_J et R_K , les constantes de Josephson et de von Klitzing. L'utilisation en métrologie de dispositifs à effet tunnel

monoélectronique a aussi fait l'objet de discussions. Les progrès à venir dans les mesures exactes de la résistance de Hall quantifiée à des fréquences de l'ordre du kilohertz suscitent beaucoup d'intérêt actuellement, comme en témoigne la création du Groupe de travail du CCEM sur les mesures en courant alternatif de la résistance de Hall quantifiée. Le problème important de la disponibilité présente et à venir de réseaux de jonctions de Josephson et d'échantillons appropriés pour la mise en œuvre de l'effet Hall quantique a été discuté. L'importance des comparaisons clés en électricité et magnétisme avait déjà été mise en évidence en 1995 lors de la création du Groupe de travail du CCEM sur les comparaisons clés. Les comparaisons clés ont, bien sûr, été le principal sujet de discussion lors de la session de 1997 et le CCEM a dressé une liste de comparaisons clés en électricité. Dans le domaine des grandeurs électriques à haute fréquence, le GT-RF mène une vigoureuse campagne de comparaisons clés, et a présenté un rapport sur ses activités au CCEM. Enfin, le CCEM a examiné les activités de la section d'électricité du BIPM.

Le rapport du Groupe de travail du CCEM sur l'utilisation de mesures électriques pour contrôler la stabilité du prototype international du kilogramme résume l'état d'avancement des différentes expériences et les incertitudes obtenues. Pour estimer les progrès accomplis, il faut garder à l'esprit que, pour pouvoir contrôler la stabilité du prototype international du kilogramme, l'incertitude relative sur une détermination indépendante de la masse du prototype doit être d'environ 1×10^{-8} au maximum.

L'incertitude relative sur l'expérience de lévitation de masses est actuellement d'environ 2×10^{-6} et à l'avenir on espère réduire cette incertitude relative au niveau de 1×10^{-7} . L'expérience sur la mesure de la constante d'Avogadro à l'aide d'un objet en silicium a été récemment examinée par le Groupe de travail du CCEM sur la constante d'Avogadro. Les valeurs expérimentales de la constante d'Avogadro, déterminées à partir de différents monocristaux de silicium, sont en accord avec une incertitude relative inférieure à 10^{-7} . Pour une détermination absolue, avec une incertitude égale ou inférieure, des valeurs absolues plus exactes de l'espacement réticulaire, du volume du cristal, et en particulier de la masse molaire sont nécessaires. La PTB (Allemagne) effectue une étude utilisant un spectromètre de masse afin d'accumuler une masse d'or qui puisse être mesurée avec exactitude. Celle-ci est limitée par le faible niveau du courant, 0,1 mA, qu'il faudra augmenter d'au moins un facteur dix pour obtenir une incertitude relative inférieure à 1×10^{-6} . En ce qui concerne les expériences de balance du watt, le NIST (États-Unis) a obtenu une incertitude relative de 9×10^{-8} sur l'expérience de mesure du watt à l'aide d'une bobine mobile ; ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par le NPL (Royaume-Uni) en 1988. Plusieurs nouvelles expériences de balance du watt sont menées ; celle de l'OFMET (Suisse) est fondée sur une approche très différente : la partie mobile est séparée de celle servant à la pesée, et l'aimant permanent est suspendu à la balance, qui est un instrument du commerce modifié.

À l'époque de la session du CCEM, l'ajustement par le Committee on Data for Science and Technology (CODATA) des valeurs des constantes fondamentales par la méthode des moindres carrés était presque achevé. En combinant des valeurs de K_J obtenues à partir de déterminations de différentes constantes, disponibles en 1988 ou plus récentes, et en tenant compte des calculs les plus récents de la constante de structure fine et de nouvelles déterminations de la constante d'Avogadro et du coefficient gyromagnétique du proton, on a obtenu une valeur de K_J en excellent accord avec la valeur adoptée, K_{J-90} , compte tenu de l'incertitude attribuée à la différence entre K_{J-90} et K_J .

En ce qui concerne R_K , de nouvelles valeurs tiennent compte de la valeur révisée de la constante de structure fine ; d'autres sont obtenues au moyen de condensateurs calculables ou déduites d'une nouvelle détermination du coefficient gyromagnétique du proton dans un champ faible combinée à d'autres constantes fondamentales. La valeur adoptée, R_{K-90} , est toujours en excellent accord avec les valeurs expérimentales. Le nouvel ajustement de CODATA est maintenant terminé. Il montre que R_{K-90} se situe à plusieurs 10^{-8} près de l'estimation de R_K de 1999. Ce résultat conduira probablement le CCEM à étudier l'éventualité de réduire l'incertitude attribuée à la différence entre R_{K-90} et R_K . L'incertitude attribuée à la différence entre K_{J-90} et K_J doit aussi être examinée, bien que, à présent, la nécessité de la réduire soit moins évidente.

Des études sur la reproductibilité de la résistance de Hall quantifiée, en fonction de la nature du matériau utilisé, du numéro du plateau et de la géométrie de l'échantillon, montrent qu'elle est indépendante de ces paramètres à un niveau d'incertitude relative de 4×10^{-10} . En ce qui concerne les valeurs aberrantes éventuelles de la résistance de Hall quantifiée observées sur certains dispositifs Si-MOSFET, le CCEM a conclu qu'elles provenaient probablement d'imperfections dans la quantification de la résistance de Hall, imperfections qu'il est possible de déceler en appliquant les directives du CCEM pour la mesure de la résistance de Hall quantifiée. Le CCEM en tire la conclusion que ces directives sont toujours applicables au plus haut niveau d'exactitude.

De récents progrès dans l'utilisation en métrologie de l'effet tunnel mono-électronique ont été effectués en utilisant un dispositif de pompe à effet tunnel monoélectronique pour mesurer avec exactitude la charge de condensateurs cryogéniques. Une autre étude prometteuse concerne une expérience dans laquelle on obtient par transport de monoélectrons au travers du dispositif un courant mille fois supérieur, à l'aide d'une onde acoustique de surface à une fréquence de 2 GHz.

Actuellement, l'une des principales activités en métrologie électrique consiste à relier avec exactitude les mesures de résistance de Hall quantifiée aux mesures de capacité. Deux approches sont utilisées. La première fait appel à des mesures en courant continu de la résistance de Hall quantifiée et

relie la résistance à la capacité au moyen d'une chaîne comprenant une résistance dont la composante réactive d'impédance est suffisamment bien connue, de telle façon que la différence entre sa résistance mesurée en courant continu et celle que l'on mesure en courant alternatif soit connue avec exactitude. La seconde approche consiste à mesurer la résistance de Hall quantifiée directement à une fréquence de l'ordre du kilohertz. Aujourd'hui, plusieurs laboratoires obtiennent des incertitudes relatives de plusieurs 10^{-8} sur les mesures de capacité liées à la résistance de Hall quantifiée au moyen de la première méthode. La seconde méthode s'est heurtée à un certain nombre de problèmes. Lorsque la résistance de Hall quantifiée est mesurée à des fréquences de l'ordre du kilohertz, elle semble s'écarter de sa valeur en courant continu de 1×10^{-7} , en valeur relative, ou plus. De plus, les plateaux de résistance de Hall semblent se rétrécir et présentent une structure indésirable quand la fréquence augmente. Compte tenu de ces problèmes, le CCEM a créé un Groupe de travail sur les mesures de la résistance de Hall quantifiée en courant alternatif pour stimuler la coopération entre les chercheurs afin de résoudre ces problèmes et mettre au point une série de directives pour mesurer avec exactitude la résistance de Hall quantifiée en courant alternatif.

Le CCEM est conscient du danger de pénurie dans l'approvisionnement en échantillons de résistance de Hall quantifiée et de réseaux de jonctions de Josephson de qualité métrologique. Plusieurs laboratoires nationaux de métrologie fabriquent avec succès de petites quantités d'échantillons de résistance de Hall quantifiée. Sur une plus large échelle, le Laboratoire central des industries électriques du BNM (BNM-LCIE) a organisé en 1995 un projet, sous l'égide de l'EUROMET, en vue de la fabrication d'échantillons de résistance de Hall quantifiée appropriés par un laboratoire industriel français qui avait produit, en 1990, 350 échantillons dans le cadre d'un projet commun au BIPM et à l'EUROMET. En juillet 1998, 440 hétérostructures GaAs/AlGaAs ont été fournies. Dix-neuf laboratoires de métrologie ont maintenant reçu des échantillons et les résultats des essais indiquent que plus de 60 % des échantillons sont de bonne qualité.

De même, plusieurs laboratoires nationaux de métrologie produisent avec succès des réseaux de jonctions de Josephson en petite quantité. D'autres ont transféré avec succès, ou sont en voie de transférer, leur technologie de fabrication de ces réseaux à des firmes industrielles. (Remarque : à ma connaissance, seul le NIST a transféré cette technologie à la firme Hypres. La PTB est en cours de transfert, mais je ne peux affirmer que celui-ci est achevé. Je me rappelle aussi que M. Endo de l'Electrotechnical Laboratory (ETL, Japon) a mentionné un transfert de technologie pour la fabrication de réseaux de 1 V à une petite firme industrielle japonaise. Cette firme a fourni un de ces réseaux au BIPM, mais je ne connais pas d'autre laboratoire qui les ait utilisés. Cette firme ne produit pas de réseaux de 10 V.)

Depuis sa création en 1927 le CCE/CCEM, le plus ancien des Comités consultatifs du Comité international, n'a cessé de s'intéresser de près aux comparaisons internationales, aussi lorsque le concept de comparaisons clés a été introduit, il en a rapidement établi une liste. Lors de sa session de 1997, le CCE a approuvé cette liste de comparaisons clés comme fondement à l'équivalence des mesurages et des étalons nationaux dans le domaine des mesures électriques. Il a aussi reconnu que les comparaisons clés et leur périodicité pourraient ne pas être suffisants pour répondre aux demandes de traçabilité et qu'il conviendrait, de temps en temps, d'effectuer des comparaisons supplémentaires.

Enfin, lors de sa session de 1995, le CCE a décidé de commencer deux nouvelles comparaisons en courant continu et à basse fréquence.

Le Groupe de travail du CCEM sur les comparaisons clés s'est réuni lors de la Conférence on Precision Electromagnetic Measurements de 1998 (CPEM'98) pour affiner la liste des comparaisons clés et œuvrer à l'établissement d'une liste de résultats de comparaisons internationales effectuées sous l'égide du CCEM et du BIPM avant que le système de comparaisons clés n'ait été mis en place. Ce groupe s'est réuni à nouveau les 6 et 7 juillet 1999, réunion pendant laquelle il a établi la liste des comparaisons à recommander au CCEM comme comparaisons clés provisoires à inclure dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés. Il recommande comme comparaisons clés provisoires trois comparaisons en courant continu et à basse fréquence et six comparaisons du GT-RF. Il recommande aussi d'ajouter à la base de données du BIPM sur les comparaisons clés sept comparaisons clés que le BIPM effectue de manière continue.

Dans le contexte du MRA et des « Directives pour les comparaisons clés du CIPM », le groupe de travail a discuté en détail du projet B du rapport sur la comparaison de mesure de capacités de 10 pF qui vient de s'achever et a décidé de demander certains changements au rapport. Il a ensuite discuté de nouvelles comparaisons possibles de mesure de résistances et de capacités à des valeurs différentes de celles qui sont en cours ou achevées. Il a approuvé une proposition d'organiser, au sein du CCEM, une réunion d'experts en métrologie du magnétisme pour discuter de l'organisation des comparaisons dans ce domaine. La réunion s'est achevée sur une discussion sur l'organisation du CCEM et de ses groupes de travail.

Le GT-RF s'est réuni en juin 1997 pour discuter de la liste des comparaisons clés dans ce domaine. Il a discuté des recommandations de son sous-groupe de travail sur les comparaisons clés, sous-groupe qui s'était réuni à Braunschweig (Allemagne) à l'occasion de la CPEM'96. Quatre comparaisons avaient alors été achevées depuis la précédente Conférence générale, trois étaient presque achevées, sept étaient en cours, trois nouvelles comparaisons avaient été approuvées et de nouveaux projets de comparaisons à venir étaient à l'étude.

Le GT-RF s'est réuni à nouveau le 7 juillet 1998 à Washington DC (États-Unis) à l'occasion de la CPEM'98. Deux autres comparaisons étaient achevées. L'état d'avancement des comparaisons en cours a été discuté ainsi que d'éventuelles comparaisons à venir. Une nouvelle comparaison a été approuvée lors de cette réunion.

Le GT-RF s'est encore réuni le 30 juin 1999. Il a recommandé au CCEM six comparaisons achevées en tant que comparaisons clés provisoires. Après discussion sur deux comparaisons achevées et sur l'état d'avancement des douze comparaisons en cours, le GT-RF a décidé d'effectuer deux nouvelles comparaisons. Enfin, le GT-RF a identifié cinq thèmes potentiels de comparaisons clés.

Les comparaisons clés sont de toute évidence une activité importante du CCEM ; environ quarante comparaisons clés sont terminées ou en cours. Des comparaisons clés du BIPM dans le domaine de l'électricité sont effectuées en permanence et représentent une charge de travail considérable : depuis la précédente Conférence générale, sept comparaisons sur place d'étalons de Josephson, trois comparaisons sur place d'étalons de résistance de Hall quantifiée et vingt comparaisons bilatérales d'étalons de résistance et de tension au moyen d'étalons voyageurs classiques ont été achevées.

M. Bordé remercie M. Göbel pour la présentation de son rapport et demande s'il y a des questions. M. Carneiro (Danemark) attire l'attention sur le fait que, bien que l'on puisse mesurer l'effet Hall quantique avec une incertitude relative de l'ordre de 10^{-9} dans les laboratoires nationaux de métrologie, l'incertitude à laquelle l'utilisateur final a accès est bien plus élevée. Il demande si le CCEM a étudié ce qui pourrait être fait pour améliorer l'efficacité de la dissémination des unités électriques. M. Göbel répond que l'incertitude plus élevée transférée à l'utilisateur final ne pose pas de problème pour le moment. La priorité du CCEM était de réduire l'incertitude des mesures au plus haut niveau, et la prochaine étape sera d'améliorer les étalons de transfert et donc la dissémination à l'utilisateur final.

M. Witt (BIPM) commente que des progrès conséquents ont déjà été réalisés au BIPM en ce qui concerne l'exactitude des étalons de transfert de tension. En corrigeant pour les dépendances en pression et en température et en considérant le bruit en $1/f$ d'un étalon de Zener voyageur du BIPM, les résultats obtenus ont été améliorés d'un ordre de grandeur.

M. Bordé demande s'il est possible de vérifier la loi d'Ohm dans le cadre de la mécanique quantique. M. Göbel répond que c'est une question clé. La constante de Josephson et la constante de von Klitzing se rapportent à des effets quantiques macroscopiques, mais, pour vérifier la loi d'Ohm, il faut une constante pour le courant fondée sur un effet quantique. Il espère que l'on pourra y parvenir au moyen de dispositifs à tunnel mono-électronique, et apporte son soutien à la poursuite des études.

11.5 Comité consultatif de thermométrie

Mme K.B. Gebbie, présidente du Comité consultatif de thermométrie (CCT), présente son rapport ainsi que le projet de résolution I sur l'extension de l'Échelle internationale de température au-dessous de 0,65 K (voir page 171).

Le CCT ne s'est réuni qu'une fois depuis la précédente Conférence générale. Les discussions ont porté sur les rapports de ses groupes de travail, ainsi que sur l'EIT-90 : les trois types de non-unicité, la reproductibilité des points fixes, les questions relatives à l'emploi d'instruments d'interpolation, les informations nouvelles sur $(T - T_{90})$, et les incertitudes sur la réalisation de l'EIT-90. Une discussion sur les échelles de température au-dessous de 1 K et l'extension éventuelle de l'EIT-90 au-dessous de 0,65 K a abouti à proposer au Comité international une recommandation concernant l'importance croissante de ces mesures. Une seconde recommandation se rapporte aux mesures de température au-dessus de 2500 K.

Une seconde réunion du CCT, qui devait avoir lieu en juin 1999, a été repoussée au printemps 2000. Après discussion avec les présidents des groupes de travail du CCT, Terry Quinn et moi-même avons décidé qu'il était préférable d'attendre les résultats des comparaisons clés pour réunir le CCT, afin qu'il les examine et éventuellement les approuve.

Points fixes de définition et instruments d'interpolation

Nos efforts concernent ici principalement l'amélioration des techniques pour la réalisation des points fixes de l'EIT-90 et l'emploi des instruments d'interpolation, l'étude de la non-unicité et la mise à jour du document *Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990*.

Deux articles sur l'EIT-90 ont paru dans *Metrologia*. Le premier traite des objectifs d'une échelle internationale de température et présente les concepts de base de l'EIT-90, y compris ceux de la non-unicité et des points fixes de température qui sous-tendent l'échelle. Le second recommande des techniques de comparaison, au plus haut niveau d'exactitude, de cellules à points fixes pour la thermométrie par contact. Un autre article traite de l'influence des impuretés sur la température des points fixes.

Les recherches se poursuivent sur la stabilité des thermomètres à résistance de platine étalons à haute température, sur la non-unicité, sur les points fixes et leur réalisation, et sur les méthodes d'interpolation pour l'EIT-90.

Une version révisée de *Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990* est en préparation.

Points fixes secondaires et techniques permettant une réalisation approchée de l'EIT-90

Deux tâches principales liées à cette activité sont achevées : il s'agit de la publication d'une nouvelle liste des points fixes secondaires et d'une révision des tables de référence pour les thermocouples et les thermomètres à résistance de platine industriels. La principale activité qui reste à accomplir est la révision de la monographie *Techniques for Approximating the International Temperature Scale of 1990*.

Équivalence internationale des mesures de température

Nos activités concernent principalement la collecte d'informations sur les comparaisons régionales et bilatérales, l'organisation de comparaisons appropriées entre les groupes régionaux au plus haut niveau d'exactitude, et la mise au point de méthodes d'estimation des incertitudes.

Certains membres du Groupe de travail 3 et des représentants des laboratoires pilotes des comparaisons clés de température se sont réunis à Bratislava au SMU (Slovaquie) en avril 1999 ; une autre réunion s'est tenue en juin 1999 au Nederlands Meetinstituut (NMI, Pays-Bas).

La plupart des comparaisons clés sont en cours. Aucun résultat n'a encore été soumis à l'approbation du CCT. Les discussions montrent qu'il n'existe pas encore de consensus clair à propos : 1) des services d'étalonnage qui doivent figurer dans l'annexe C du MRA, 2) des critères permettant de décider si les aptitudes déclarées par ces services sont cohérentes ou non avec les résultats mentionnés à l'annexe B du MRA, et 3) des comparaisons supplémentaires nécessaires, le cas échéant, pour appuyer les déclarations de l'annexe C sur les thermomètres industriels comme les thermocouples.

Une réunion du Groupe de travail 3 et de représentants des laboratoires pilotes des comparaisons clés du CCT doit avoir lieu au NIST (États-Unis) les 17 et 18 janvier 2000.

Détermination des températures thermodynamiques et extension de l'EIT-90 à de plus basses températures

Les activités dans ce domaine sont les suivantes :

- 1) Étude des déterminations de la température thermodynamique T et de la différence ($T - T_{90}$)

Peu de déterminations nouvelles ont fait l'objet de publications depuis 1996, mais un article important de Moldover et de ses collègues du NIST (*J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 1999, **104**, 11-46) sur la thermométrie acoustique dans le domaine situé entre 217 K et 303 K montre des écarts par rapport à

l'EIT-90 pouvant atteindre 4,6 mK, ce qui a des implications significatives sur l'exactitude de l'échelle à de plus hautes ou de plus basses températures.

Plusieurs expériences sont programmées dans un certain nombre de laboratoires, y compris, par exemple, la continuation des travaux jusqu'à 800 K au NIST (États-Unis), la thermométrie à bruit au Measurement Standards Laboratory of New Zealand (MSL, Nouvelle-Zélande) jusqu'à 693 K et à la PTB (Allemagne) jusqu'à 1830 K, la thermométrie à rayonnement total ou spectral au NPL (Royaume-Uni), à la PTB et dans d'autres laboratoires, et la thermométrie à gaz dans différents domaines au-dessous de 300 K, au moyen de thermomètres à volume constant, à constante diélectrique ou à diffusion de Rayleigh, respectivement au NMI, à la PTB et au NPL.

Ce sont des expériences à long terme, et il faudra beaucoup de temps avant d'avoir une idée plus claire de l'exactitude de l'EIT-90. En attendant, le MSL effectue une analyse théorique détaillée de la résistivité du platine afin de vérifier la cohérence des résultats expérimentaux obtenus.

2) Étude de l'échelle de pression de vapeur de ^3He au-dessous de 3 K

Des expériences sur la thermométrie à tension de vapeur de ^3He ont été menées au NIST et au NMI, d'autres sont en cours à la PTB. Les difficultés et les différences dans les résultats augmentent quand la température baisse, mais il est important d'établir l'exactitude de l'EIT-90 à sa limite actuelle la plus basse, et d'obtenir une corrélation exacte entre la pression de vapeur de ^3He et la pression de fusion de ^3He , nécessaire à l'extension de l'échelle.

3) Étude des échelles de température au-dessous de 0,65 K

Le but de cette activité est de proposer une recommandation au CCT sur l'extension de l'EIT-90 jusqu'à 1 mK. Les progrès réalisés dans la mise au point de l'équation de pression de fusion de ^3He ont été examinés lors d'un atelier qui s'est tenu à Leyde (Pays-Bas) en septembre 1998. Les différences entre les échelles établies à la PTB et au NIST, ainsi qu'à l'université de Floride, sont considérables aux températures les plus basses ; elles ont depuis été analysées en détail au moyen de calculs thermodynamiques. Nous ne sommes parvenus à aucune conclusion définitive, et nous ne voyons pas clairement si nous parviendrons à un accord sur une équation de pression de fusion provisoire avant la session du CCT qui doit se tenir en avril 2000.

Le Groupe de travail 4 a prévu de se réunir au NIST les 20 et 21 janvier 2000.

Détermination des températures thermodynamiques des corps noirs à haute température

Un groupe de travail *ad hoc* commun au CCT et au CCPR travaille à comparer les mérites de l'EIT-90 et de la radiométrie absolue pour la mesure des températures thermodynamiques des corps noirs à haute température.

L'EIT-90 recommande d'effectuer ces mesures au moyen de la thermométrie à rayonnement monochromatique et par référence, au choix, aux points de congélation de l'argent, de l'or ou du cuivre. Un certain nombre de radiométristes préfèrent, toutefois, utiliser d'autres méthodes comme la mesure absolue du flux énergétique dans une bande spectrale bien définie à l'aide d'un radiomètre cryogénique, ou la mesure du rapport des flux énergétiques dans au moins deux bandes spectrales à une seule température.

Dans son rapport préliminaire à la session de 1996 du CCT, le groupe de travail avait conclu que l'EIT-90 était alors un peu plus exacte et facile à mettre en œuvre pour les applications de routine que la radiométrie absolue, mais que, pour un expert de ces domaines, la radiométrie absolue pouvait être dans certains cas un peu plus exacte. Les deux méthodes devraient à terme offrir la même exactitude.

Des comparaisons internationales restreintes de radiomètres à filtre et de corps noirs sont en cours, le NPL et le NIST étant les laboratoires pilotes.

Mesures d'humidité

Un Groupe de travail sur les mesures d'humidité a été créé en 1994, pour répondre aux demandes de plus en plus nombreuses émanant de l'industrie en matière d'étalons d'humidité et en raison de l'importance croissante de ces mesures et étalons dans les laboratoires nationaux. Depuis cette date, le groupe a centré ses efforts sur la première des quatre tâches qui lui ont été confiées, c'est-à-dire l'organisation d'une comparaison internationale de générateurs d'humidité (étalons à point de rosée), qui est en cours. Les comparaisons régionales au sein de l'APMP, de l'EUROMET et du SIM seront suivies d'une comparaison internationale. Ceci permettra de lier pleinement les résultats des comparaisons des organisations régionales de métrologie à ceux obtenus lors des comparaisons du Comité international.

Dans le cadre de l'EUROMET, deux hygromètres étalons de transfert à point de rosée du NPL, qui, ensemble, couvrent le domaine allant de -75 °C à 80 °C, ont circulé entre huit laboratoires nationaux : le Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques (CETIAT, France), l'IMGC (Italie), l'Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA, Espagne), le Mittatekniikan Keskus (MIKES, Finlande), le NMI (Pays-Bas), le NPL (Royaume-Uni), l'OFMET (Suisse) et la PTB (Allemagne). Les résultats de la comparaison ont été présentés à l'International Symposium on Humidity and Moisture qui s'est tenu au NPL en avril 1998.

Dans le cadre de la comparaison internationale en cours, des comparaisons au moyen d'un étalon de transfert de précision à point de rosée de l'INTA ont été réalisées entre les laboratoires nationaux suivants : l'INTA, le NIST, le NPL et la PTB. Les résultats d'une comparaison bilatérale entre les générateurs d'humidité étalons de l'INTA et du NIST dans le domaine allant de -70 °C à 20 °C ont aussi été présentés à ce symposium international.

Dans le cadre du SIM, le NIST fournira un hygromètre de précision à point de rosée qui servira d'étalon de transfert pour une comparaison entre trois laboratoires nationaux : le CENAM (Mexique), l'Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO, Brésil) et le NIST (États-Unis).

Dans le cadre de l'APMP, une comparaison est en cours entre les laboratoires nationaux suivants : le Centre for Measurement Standards (CMS, Taiwan), le KRISS (République de Corée), le NML (Australie), le National Research Center for Certified Reference Materials (NRCCRM, Chine), le NRLM (Japon), le Singapore Productivity and Standards Board (SISIR, Singapour) et le Standards and Industrial Research Institute (SIRIM, Malaisie). Un hygromètre de précision à point de rosée du NRLM est utilisé comme étalon de transfert.

Mme Gebbie rend ensuite hommage à M. Luigi Crovini, décédé soudainement le 21 octobre 1995 à l'âge de 58 ans. Luigi a participé à toutes les réunions du CCT depuis la 9^e session en 1971 jusqu'à la 18^e en 1993, première session qu'il présida. Au moment de son décès, il était directeur de l'IMGC, directeur du Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), et secrétaire désigné du Comité international. Il s'intéressait à de nombreux sujets scientifiques et ses nombreuses publications comprennent des articles consacrés non seulement à la thermométrie et aux échelles de température, mais aussi aux propriétés thermiques des matériaux, aux mesures acoustiques, à l'hygrométrie et à divers aspects de la métrologie. Au cours des années 1980, il a joué un rôle clé dans la mise au point de l'EIT-90. Pendant la brève période où il fut président du CCT, il mit en œuvre des études sur la mise en pratique de l'EIT-90 et son extension à des températures plus basses. Un numéro spécial de *Metrologia* (1996, **33**, n° 4) lui est dédié en gage d'amitié et d'estime.

Le projet de résolution I sur l'extension de l'Échelle internationale de température au-dessous de 0,65 K est ensuite approuvé à l'unanimité comme Résolution 9 (voir page 143).

11.6 Comité consultatif de photométrie et radiométrie

M. A.J. Wallard, président du Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR), présente le rapport suivant.

Le CCPR s'est réuni deux fois depuis la 20^e Conférence générale des poids et mesures ; il a tenu sa 14^e session au BIPM les 10 et 11 juin 1997 et sa 15^e session, également au BIPM, du 24 au 26 mars 1999. Le Comité s'est intéressé principalement au choix des comparaisons clés qui seront organi-

sées dans le cadre du MRA et à la coordination des activités de ses groupes de travail.

Comparaisons clés

Lors de sa 14^e session, le CCPR a identifié six comparaisons clés, d'après les recommandations du Groupe de travail sur les comparaisons clés dont le président est M. A.C. Parr, du NIST (États-Unis) :

Éclairement énergétique spectral (CCPR-K1) entre 250 nm et 2500 nm. Le laboratoire pilote de cette comparaison d'éclairement énergétique spectral est le NPL (Royaume-Uni) ; elle devrait se dérouler entre avril 1999 et mai 2000. L'un des aspects intéressants de cette comparaison est qu'elle permettra au CCPR d'évaluer les performances des lampes de type FEL ou Polaron (type II), et d'observer, le cas échéant, les effets du transport, manuel ou impersonnel, sur les performances de ces lampes. Ces aspects de la comparaison fourniront des arguments pour discuter des mérites relatifs de ces deux types de sources.

Sensibilité spectrale (CCPR-K2). Il s'agit d'une comparaison sur les performances de récepteurs, dans trois domaines de longueur d'onde :

- proche infrarouge (900 nm à 1600 nm) : le NIST est le laboratoire pilote de cette comparaison qui devrait s'achever en août 2000 ;
- visible (300 nm à 1000 nm) : le BIPM coordonne cette comparaison qui devrait débuter en janvier 2000 et s'achever en juin 2001 ;
- ultraviolet (200 nm à 400 nm) : cette comparaison, qui débutera en juillet 2000, est coordonnée par la PTB (Allemagne) ; elle devrait s'achever en 2001.

Bien que cette comparaison soit une répétition d'une comparaison similaire de mesures de sensibilité spectrale dont le rapport avait été présenté à la précédente Conférence générale, elle est opportune en raison de l'emploi, maintenant répandu dans de nombreux laboratoires, de radiomètres cryogéniques. De plus, la précédente comparaison était limitée au domaine de longueur d'onde situé entre 250 nm et 1000 nm.

Intensité et sensibilité lumineuse (CCPR-K3.a et CCPR-K3.b). Deux comparaisons d'intensité et de sensibilité lumineuse, liées entre elles, sont achevées. Elles faisaient partie de la liste des comparaisons décidées par le CCPR en 1994 lors de sa 13^e session : l'une était une comparaison d'intensité lumineuse fondée sur des lampes, l'autre une comparaison photométrique fondée sur des récepteurs. Elles étaient coordonnées respectivement par la PTB et par le BIPM. Leurs résultats sont discutés plus bas dans ce rapport.

Flux lumineux (CCPR-K4). La PTB est le laboratoire pilote de cette comparaison de flux lumineux, qui s'est déroulée en même temps que celle d'intensité lumineuse. Les mesures sont maintenant terminées et les résultats sont discutés plus bas dans ce rapport.

Facteur de réflexion spectrale diffuse (CCPR-K5). Le NIST est le laboratoire pilote de cette comparaison de facteur de réflexion spectrale diffuse ; elle sera limitée au domaine du visible pour lequel les conditions de mesure doivent être soigneusement précisées. Elle devrait débuter en l'an 2000. Lors de la préparation de cette comparaison, le Comité a constaté que plusieurs laboratoires utilisaient des goniophotomètres, au lieu des sphères intégrantes traditionnelles, pour mesurer le facteur de réflexion diffuse et que des anomalies apparaissaient dans les résultats. Un petit sous-groupe de laboratoires a accepté d'en étudier les causes.

Facteur de transmission spectrale régulière (CCPR-K6). Cette comparaison de facteur de transmission spectrale régulière a été choisie en raison de l'intérêt croissant porté, notamment, aux industries du verre à usage pharmaceutique, des plastiques et des boissons ; le laboratoire pilote sera le BNM-INM (France). Les filtres utilisés dans cette comparaison ont été choisis ; la comparaison sera coordonnée avec la comparaison CCPR-K5.

Autres comparaisons du CCPR

Le CCPR a décidé d'organiser trois comparaisons supplémentaires :

Luminance énergétique spectrale (CCPR-S1). Cette comparaison de luminance énergétique spectrale, dont le laboratoire pilote est l'Institut de recherche de Russie pour les mesures en optique physique (VNIIOFI, Fédération de Russie), devrait s'achever en novembre 1999. Elle couvre le domaine situé entre 220 nm et 2200 nm et est fondée sur de nouveaux corps noirs de référence, de haute performance, ainsi que sur une série de lampes.

Aire d'ouverture (CCPR-S2). C'est une comparaison importante qui servira à vérifier les aptitudes de mesure des laboratoires et les techniques de mesure des ouvertures proprement dites, mesure qui constitue un facteur critique dans de nombreux cas. Cette comparaison a été repoussée à une date ultérieure en raison de travaux dans les laboratoires du NIST, qui en est le laboratoire pilote.

Radiomètres cryogéniques (CCPR-S3). Cette comparaison, qui s'est achevée en 1999, a permis de comparer avec succès dix-sept radiomètres cryogéniques de manière indirecte, à l'aide de récepteurs de transfert.

Analyse des comparaisons clés

Lors de sa 14^e session, le CCPR avait décidé d'établir un groupe de travail restreint, coordonné par son président, afin de superviser la réception et l'analyse des rapports des comparaisons clés du Comité international, ainsi que les rapports des comparaisons clés ou des comparaisons supplémentaires des organisations régionales de métrologie. Ses premières réunions ont été prévues pour coïncider avec des événements majeurs tels que les conférences

NEWRAD ou CORM. Ces réunions ont fait l'objet de vastes discussions sur la meilleure façon d'analyser les résultats des mesures photométriques et radiométriques, en particulier les résultats aberrants, et sur les différentes manières d'évaluer la valeur de référence lorsqu'une grandeur dépend fortement de la répartition spectrale.

Ces réunions, associées à de nombreux échanges de courrier électronique et postal, ont servi de préparation à la réunion du Groupe de travail sur les comparaisons clés, tenue la veille de la 15^e session du CCPR, et ont permis au groupe de se mettre d'accord sur le point suivant : si les laboratoires participant à une comparaison clé approuvent un bilan d'incertitude robuste pour chaque participant, la moyenne calculée à partir des résultats individuels, pondérée par l'inverse du carré de l'incertitude de chaque participant, devrait être statistiquement robuste. Le CCPR espère pouvoir se conformer à cet arrangement idéal le moment venu, mais il reconnaît que pour les comparaisons en cours, il ne dispose pas toujours d'une analyse complète du bilan d'incertitude. Pour les comparaisons achevées, le CCPR a approuvé la recommandation du groupe de travail qui consiste à fixer par consensus un certain seuil d'incertitude, représentatif de l'état de l'art en la matière, lorsque les incertitudes individuelles déclarées par certains participants paraissent trop faibles.

Cette approche a été adoptée pour les comparaisons clés en photométrie (c'est-à-dire celles qui n'impliquent pas une forte dépendance spectrale) et a été appliquée au calcul des résultats définitifs qui figureront dans les rapports préparés pour publication et qui seront inclus dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés.

Le groupe de travail reconnaît qu'il doit résoudre le problème difficile des résultats qui varient en fonction de la longueur d'onde avant de donner des directives aux laboratoires pilotes et aux laboratoires participant à ces comparaisons.

D'ici là, et pour toutes les mesures de chaque comparaison à venir, le CCPR insiste pour avoir accès à des bilans complets d'incertitude qui soient méticuleusement documentés, puis examinés et discutés de manière critique au sein de l'assemblée des participants à la comparaison.

Le groupe de travail étudiera aussi les résultats des comparaisons des organisations régionales de métrologie, si celles-ci sont effectuées en accord avec les procédures agréées dans le cadre de l'arrangement de reconnaissance mutuelle.

Groupe de travail sur la radiométrie spectrale pour l'ultraviolet dans l'air

Les activités de ce groupe de travail, qui prend de plus en plus d'importance, continuent. De nouvelles techniques relatives aux sources et aux récepteurs voient le jour, et de nouveaux besoins apparaissent, aussi le CCPR encou-

rage-t-il vivement l'usage de récepteurs tels que les radiomètres cryogéniques auprès des synchrotrons ou des anneaux de stockage d'électrons, qui peuvent fournir, dans le domaine de l'ultraviolet aux courtes longueurs d'ondes, une alternative intéressante à l'emploi des sources utilisées en dosimétrie des rayons x pour les étalonnages.

Depuis la précédente Conférence générale, le groupe de travail poursuit les comparaisons de luminance énergétique spectrale dans le domaine situé entre 200 nm et 400 nm ; l'accord entre les résultats des participants est satisfaisant à proximité de 200 nm ; les résultats du NIST, de la PTB et du NPL sont en accord à un écart-type près. Ces comparaisons ont aussi révélé que les lampes à deutérium, bien que montrant des signes de vieillissement, peuvent encore être utilisées pour les comparaisons et pour la conservation de la puissance énergétique spectrale relative plutôt que comme échelle absolue. Les mesures de luminance énergétique spectrale se sont avérées plus satisfaisantes que les mesures d'éclairement énergétique spectral, dont les résultats étaient moins bons que ceux de la comparaison de 1992.

Dans ce domaine comme dans d'autres, les méthodes fondées sur des récepteurs continuent à s'améliorer, comme en témoignent les diverses réunions qui ont eu lieu, notamment à la PTB et à l'occasion de la conférence NEWRAD. Les photodiodes en platine-silicium montrent une meilleure stabilité et peuvent maintenant être considérées comme des étalons de transfert acceptables, en particulier dans le domaine situé entre 200 nm et 400 nm ; les radiomètres à filtre peuvent atteindre une incertitude relative inférieure à 5×10^{-3} . Le groupe a été convié à poursuivre ses études ; il présentera un nouveau programme de travail à la 16^e session du CCPR.

Groupe de travail commun au CCT et au CCPR

Le groupe de travail commun au CCT et au CCPR avait envisagé d'effectuer des comparaisons de mesure de température au moyen de radiomètres à filtre par référence au point de l'or. Les travaux ont été repoussés à une date ultérieure en raison de la lourde charge de travail apportée aux laboratoires nationaux de métrologie par le programme de comparaisons clés.

Conclusions

Le CCPR continue de constater que des demandes spécifiques émanent de laboratoires qui utilisent des sources laser pour des mesures de puissance, en vue d'applications telles que, par exemple, la fabrication de microcircuits de haute résolution. Certains besoins nouveaux se font aussi sentir dans les domaines des techniques informatiques utilisant des fibres optiques et de l'optoélectronique. Ces besoins, identifiés par le CCPR, se rapprochent des centres d'intérêt d'autres comités consultatifs tels que le CCEM. Les présidents du CCPR et du CCEM avaient étudié brièvement leurs points d'intérêt

communs potentiels après la 14^e session du CCPR, mais ils n'avaient pas constaté de besoins impératifs qui ne soient déjà couverts ou traités, comme c'est le cas des instruments de mesure de puissance optique, au niveau des organisations régionales de métrologie. Lors de sa 15^e session, le CCPR a accepté l'offre du NIST d'étudier la question et de présenter un rapport au CCPR.

L'intérêt du Comité continue à être stimulé par l'existence d'un nombre de plus en plus grand de radiomètres cryogéniques dans les laboratoires nationaux de métrologie. Ceux-ci présentent une exactitude correspondant habituellement à une incertitude relative inférieure à plusieurs 10^{-4} . Ces instruments sont donc les meilleurs dans le domaine du visible et de l'infrarouge. De nouveaux corps noirs à haute température offrent des possibilités nouvelles et des étalons de transfert fondés sur des récepteurs constituent un défi aux échelles actuelles fondées sur des sources. La technique évolue en ce domaine et promet de stimuler les laboratoires nationaux de métrologie dans un proche avenir.

Pour terminer, n'étant président du CCPR que depuis 1996, je tiens à rendre hommage à M. William Blevin, mon prédécesseur. Expert mondialement reconnu, il a non seulement contribué personnellement au domaine, mais a aussi guidé le CCPR pendant quatorze années au cours desquelles des avancées notables ont vu le jour, en particulier la redéfinition de la candela qui découle directement de sa proposition.

Le CCPR tiendra sa 16^e session en 2001.

M. Bordé remercie M. Wallard et mentionne la difficulté à comparer l'intensité de lumières cohérentes et incohérentes. M. Wallard acquiesce qu'il s'agit d'un problème important. Il dit que de nombreux laboratoires utilisent maintenant des sources cohérentes (lasers) dans un domaine de longueurs d'ondes très large. Un problème rencontré avec les sources non cohérentes est que l'intensité du faisceau n'est pas constante sur la surface du récepteur.

11.7 Comité consultatif des rayonnements ionisants

M. G. Moscati, président du Comité consultatif des rayonnements ionisants (CCRI), précédemment appelé le Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants (CCEMRI), présente le rapport suivant.

Les rayonnements ionisants jouent un rôle important dans de nombreux domaines des sciences et des techniques. La mesure exacte des rayonnements ionisants est cruciale en radiothérapie, mais d'autres applications médicales et industrielles imposent une forte demande sur les services métrologiques ; par exemple il devient de plus en plus capital pour de nombreux gouver-

nements de mesurer le niveau d'activité dans l'environnement. De hauts niveaux d'activité (du TBq au PBq) sont utilisés en radiothérapie, pour la radiographie gamma, pour la conservation des aliments, pour la stérilisation des instruments médicaux et dans l'industrie nucléaire. Les niveaux de dose sont aussi élevés (du Gy au MGy) tant pour les sources de radionucléides que pour les accélérateurs linéaires. En radiopharmacie et curiethérapie sont employés des niveaux moyens d'activité (du MBq pour les diagnostics au GBq pour la thérapie) et de dose (du mGy au Gy) ; les équipements de diagnostic à rayons x délivrent des rayonnements correspondant aux valeurs les plus faibles de ces domaines. Enfin de faibles niveaux d'activité (du Bq au kBq) et de dose (du μ Gy au mGy) sont nécessaires par exemple pour évaluer la contamination dans l'environnement et pour la dosimétrie individuelle. Toutes ces applications réunies demandent d'être capable de mesurer un large domaine de types de rayonnement, d'énergie et de dose.

Alors que l'incertitude de mesure nécessaire aux utilisateurs est modeste par rapport à d'autres domaines de la métrologie (de 1 % en radiothérapie à 10 % pour les mesures relatives à l'environnement), il est crucial de parvenir à l'exactitude prescrite, toute erreur pouvant avoir des conséquences dangereuses pour la vie humaine. Dans les laboratoires nationaux de métrologie, les incertitudes doivent être inférieures d'au moins un ordre de grandeur à celles des laboratoires d'étalonnage, lesquels doivent eux-mêmes obtenir une exactitude meilleure que celle qui correspond aux besoins de l'utilisateur final. Il n'existe pas de méthode de mesure unique qui couvre tous les types, énergies, activités et doses de rayonnement d'intérêt, aussi faut-il maintenir une large variété de techniques pour relier les mesures aux unités du SI. Comme il est difficile de produire des rayonnements ionisants aux caractéristiques bien connues et qu'il faut mesurer de nombreux paramètres, la métrologie des rayonnements ionisants représente une lourde charge de travail pour les laboratoires nationaux de métrologie. Le CCRI joue un rôle clé en rassemblant des représentants des laboratoires de métrologie des rayonnements ionisants du monde entier. Le travail mis en œuvre par le CCRI, au BIPM et en dehors, assure un lien sûr et permanent entre les mesures des rayonnements ionisants et le SI.

Depuis la 20^e Conférence générale, le CCRI s'est réuni trois fois et chacune de ses trois Sections s'est réunie deux fois. La Section I (Rayons x et γ , électrons) s'est réunie du 14 au 16 avril 1997 et du 26 au 28 mai 1999 ; la Section II (Mesure des radionucléides) s'est réunie du 23 au 25 avril 1997 et du 31 mai au 2 juin 1999, et la Section III (Mesures neutroniques) s'est réunie du 21 au 22 avril 1997 et du 31 mai au 1^{er} juin 1999. Le « CCEMRI » s'est réuni les 27 et 28 juin 1996, les 7 et 8 juillet 1997, et le CCRI s'est réuni le 3 juin 1999. Depuis la session de 1997, le nombre des membres du CCRI s'est restreint ; seules les personnalités suivantes en font partie : le président du CCRI, les présidents des trois Sections, le directeur du BIPM et la secrétaire exécutive du CCRI. La réunion dure moins d'une journée et cette nouvelle formule semble bien fonctionner.

Dans ce rapport, les travaux du CCRI, qui sont en liaison étroite avec ceux du BIPM, sont décrits selon l'ordre des Sections.

Rayons x et γ , électrons

Les mesures faites au BIPM dans le domaine de la dosimétrie sont de deux types complémentaires : les comparaisons internationales approuvées par le CCRI et les étalonnages fondés sur des étalons bien reconnus et soigneusement conservés. Un programme continu de travaux de recherche et de mise au point d'étalons et de techniques de mesure soutient cette activité.

L'activité en cours de comparaisons et d'étalonnages par rapport aux étalons du BIPM de kerma dans l'air et de dose absorbée dans l'eau est considérée comme prioritaire par le CCRI. Depuis 1995, plus de trente comparaisons d'étalons primaires, auxquelles plus de vingt pays ont participé, ont été effectuées. Ce regain d'intérêt des laboratoires nationaux de métrologie est dû au MRA mis au point durant cette période. La Section I a approuvé les comparaisons à inclure dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés et elle a décidé que les étalons primaires devraient être comparés à ceux du BIPM au moins une fois tous les dix ans. Elle a aussi décidé que les valeurs déterminées pour les étalons du BIPM seraient utilisées comme valeurs de référence des comparaisons clés pour toutes les comparaisons en dosimétrie.

Des étalonnages sont effectués périodiquement pour les laboratoires qui maintiennent des étalons secondaires ; plus de quarante chambres d'ionisation appartenant à douze pays ont ainsi été étalonnées. L'AIEA coordonne, avec l'Organisation mondiale de la santé (OMS), un réseau de laboratoires de dosimétrie qui maintiennent des étalons secondaires. Ce réseau regroupe soixante-douze pays, ce qui étend considérablement la traçabilité en radiothérapie et aussi dans d'autres domaines de la dosimétrie. Les références dosimétriques de l'AIEA sont traçables aux étalons du BIPM, des étalonnages périodiques des instruments de référence (chambres d'ionisation, dosimètres thermoluminescents) étant effectués dans les faisceaux de rayonnement du BIPM.

Les étalons primaires en radiothérapie et radioprotection sont maintenus à l'aide de faisceaux de rayons x et de sources de rayonnement γ de ^{60}Co et de ^{137}Cs . L'activité de la source de ^{60}Co , employée au BIPM pour les étalons en radiothérapie, a atteint un niveau trop faible, inacceptable pour des mesures exactes ; cette source doit être remplacée cette année. L'activité de la nouvelle source sera de 170 TBq (contre 40 TBq précédemment), si bien qu'il a fallu concevoir et installer un nouveau système de sécurité et de contrôle du rayonnement. Un programme de remplacement des équipements de mesure et des installations pour les rayons x a aussi débuté ; il devrait s'achever d'ici quatre ans.

Divers paramètres liés aux étalons primaires et aux comparaisons et étalonnages ont été étudiés. Parmi ces travaux, citons le calcul (à l'aide de programmes de Monte Carlo) des facteurs de correction pour la perte d'électrons et la dispersion des photons dans les chambres d'ionisation à paroi d'air, de conceptions diverses, utilisées comme étalons nationaux, la relation entre le kerma dans l'air et la dose absorbée dans l'eau pour plusieurs étalons secondaires, et l'influence des conditions d'irradiation sur les résultats d'étalonnage de chambres d'ionisation quand elles sont utilisées pour la mesure de la dose absorbée dans l'eau.

Les faisceaux de photons et d'électrons à haute énergie délivrés par des accélérateurs linéaires sont d'usage de plus en plus fréquent en radiothérapie et aussi dans l'industrie. Un système de transfert transportable, fondé sur des chambres d'ionisation, a été mis au point pour les comparaisons entre les laboratoires nationaux de métrologie. Six laboratoires ont manifesté un intérêt immédiat pour ce système. L'Institut universitaire de radiophysique appliquée (IRA-OFMET, Suisse) a fait don d'un calorimètre en graphite pour la dosimétrie absolue, et travaille à la mise au point d'un système moderne d'acquisition des données afin de mesurer la dose absorbée dans des faisceaux de rayons x à haute énergie (jusqu'à 20 MeV).

Mesure des radionucléides

Les mesures d'activité effectuées au BIPM, en collaboration avec la Section II, comprennent à la fois des mesures absolues et des mesures relatives. Les mesures absolues concernent les comparaisons internationales pour lesquelles on distribue aux participants des échantillons d'une même solution radioactive ; les mesures relatives concernent le SIR dans lequel les laboratoires nationaux de métrologie envoient des échantillons de radionucléides émetteurs de rayonnement γ , dans un domaine d'activité donné, pour comparaison avec les sources de référence de ^{226}Ra au BIPM.

Pendant la période couverte par ce rapport, la Section II a effectué des comparaisons internationales de ^{90}Sr et de ^{204}Tl , radionucléides émetteurs de rayonnement bêta quasiment pur. Les résultats de la comparaison de ^{90}Sr sont satisfaisants. Une analyse détaillée des résultats pour le ^{204}Tl révèle des écarts significatifs et un groupe de travail a été créé pour examiner les méthodes de mesure utilisées et tous les facteurs susceptibles d'avoir une influence. Certains problèmes concernant la mesure de ^{192}Ir ont aussi été mis en évidence et il a été décidé de les étudier avant d'entreprendre une comparaison internationale. Une comparaison de mesures d'activité de ^{152}Eu est en cours et de nouvelles comparaisons de ^{89}Sr et de ^{238}Pu sont prévues pour l'an 2000. Les résultats approuvés par la Section II pour les comparaisons de mesures d'activité absolue seront inclus dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés. Certaines comparaisons datent de plus de dix ans, mais il a été jugé important de conserver ces résultats.

Le SIR joue un rôle de plus en plus important pour l'amélioration de l'assurance de qualité dans le monde, fondée sur l'équivalence internationale des mesures nationales d'activité. Au total 762 ampoules ont déjà été mesurées et 535 résultats indépendants ont été obtenus pour 59 émetteurs de rayonnement gamma, y compris quelques gaz radioactifs. L'extension du SIR aux émetteurs de rayonnement bêta pur, mesurés au BIPM selon la méthode de scintillation liquide du Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT, Espagne) et du NIST (États-Unis), a été couronnée de succès, mais il est nécessaire de disposer à l'avenir d'un système qui assure une reproductibilité à long terme. La mesure de radionucléides à courte durée de vie est à l'étude. La Section II a décidé d'utiliser les résultats du SIR, qui sont directement traçables aux mesures issues de méthodes employant des étalons primaires, afin d'établir les valeurs de référence des comparaisons clés dans le cadre du MRA. Le SIR continue à servir de système d'étalonnage pour les laboratoires qui utilisent des méthodes secondaires ou dérivées pour la mesure des radionucléides. Une monographie décrivant le SIR et l'ensemble des résultats déjà obtenus est en préparation pour publication.

La courbe d'efficacité des chambres d'ionisation du SIR a été réévaluée et les résultats ont été publiés. Un système de spectroscopie gamma, fondé sur un détecteur Ge(Li), a été mis au point au BIPM et s'est déjà avéré utile pour identifier d'éventuelles impuretés contenues dans les ampoules soumises au SIR et mesurer leur activité. Un détecteur au Ge hyperpur a été acheté, si bien qu'un système ayant une résolution meilleure est en cours de fabrication. La méthode du rapport des coïncidences triples aux coïncidences doubles pour les mesures d'activité absolue est en cours de mise au point et devrait fournir une méthode utile en complément des méthodes de mesure absolue disponibles au BIPM.

Une chambre d'ionisation étalon stable et reproductible, réalisable par n'importe quel laboratoire national de métrologie à tout moment, est en cours de mise au point au NPL (Royaume-Uni) dans le cadre d'un projet de la Section II. L'incorporation d'une telle chambre au SIR fournirait au départ un instrument de sauvegarde qui, une fois qu'il aura fait ses preuves, pourrait remplacer les chambres d'ionisation du SIR. Le fait que chaque laboratoire national de métrologie dispose de chambres identiques devrait finalement faciliter les comparaisons d'émetteurs de rayonnement gamma, en particulier des radionucléides à courte durée de vie, et permettre d'effectuer un plus grand nombre de comparaisons.

Mesures neutroniques

La principale activité de la Section III a été une comparaison internationale de mesures de fluence neutronique à 24,5 keV entre six laboratoires nationaux. Des neutrons peuvent être obtenus à cette énergie par filtration du

faisceau d'un réacteur, par émission de sources radioactives Sb-Be (γ,n), ou par réaction de faisceaux de protons sur des cibles de scandium. La comparaison a consisté à faire circuler une série de trois sphères de Bonner et un compteur proportionnel à ^3He . Le BIPM a vérifié la stabilité de l'instrument de transfert au début de la comparaison et après chaque mesure dans l'un des laboratoires participants. Une fois les incertitudes de mesure entièrement évaluées, la moyenne pondérée sera utilisée comme valeur de référence de la comparaison clé. Les résultats seront publiés dans *Metrologia*.

Des comparaisons de mesures neutroniques sont à l'heure actuelle effectuées à plusieurs énergies sélectionnées dans le domaine allant de 24,5 keV à 14,7 MeV. La Section III a décidé que, puisque les comparaisons de mesures neutroniques durent plusieurs années, toutes les comparaisons passées, certaines remontant aux années 1960, doivent être mentionnées dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés, mais aucun degré d'équivalence ne sera déterminé tant que la comparaison ne sera pas répétée. De nouvelles comparaisons sont envisagées : comparaison de débit de fluence de neutrons thermiques en faisant circuler une série de chambres d'ionisation à ^{10}B comme instruments de transfert ; comparaison de débit de fluence de neutrons rapides monoénergétiques pour laquelle chaque participant enverrait son étalon à la PTB afin que les mesures soient faites dans un court laps de temps ; et comparaison de taux d'émission de neutrons produits par une source de $^{241}\text{Am-Be}$ (α,n) qui circulera entre les participants.

Le BIPM ayant mis fin à ses activités de mesures neutroniques en août 1995, ses équipements et étalons de référence ont été restitués à leur propriétaire d'origine ou donnés aux laboratoires intéressés : ainsi, par exemple, les sphères de Bonner et les compteurs proportionnels à ^3He ont été restitués au NPL et le dispositif à bain de manganèse est maintenant installé à l'Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD) au Brésil.

M. Bordé remercie M. Moscati pour la présentation de son rapport et demande s'il y a des questions. M. Wallard demande pourquoi on ne dispose que de résultats provisoires pour les comparaisons clés du CCRI. Mme Allisy-Roberts (BIPM) explique que le terme « provisoire » indique seulement que les résultats n'ont pas encore été publiés. M. Ugur dit qu'il est satisfait de voir que les comparaisons de ^{60}Co concernent 65 % de la population mondiale, mais s'enquiert de la politique du CCRI envers les États qui ne sont pas membres de la Convention du Mètre. M. Moscati répond que le CCRI est au service des États membres de la Convention du Mètre, et que les organisations régionales de métrologie étendent cette couverture aux autres pays. Avec l'introduction d'États associés, ce service sera encore plus étendu. En réponse à une question de M. Leitner (Autriche), Mme Allisy-Roberts dit qu'à la dernière session de la Section I du CCRI, il a été décidé de ne pas inclure les mesures de dosimétrie dans la liste des comparaisons

clés du CCRI, mais de les inclure dans celle des comparaisons supplémentaires.

11.8 Comité consultatif pour la quantité de matière

M. R. Kaarls, président du Comité consultatif pour la quantité de matière (CCQM), présente son rapport ainsi que les projets de résolution J et K, sur la métrologie en chimie et la biotechnologie (*voir* page 174).

La mole et la métrologie en chimie

Depuis la 20^e Conférence générale, le CCQM s'est réuni chaque année (les 14 et 15 février 1996, les 20 et 21 février 1997, les 19 et 20 février 1998 et du 8 au 12 février 1999). L'intérêt pour la métrologie en chimie des laboratoires nationaux de métrologie et de certains laboratoires des États membres de la Convention du Mètre qui leur sont associés n'a cessé d'augmenter au cours des cinq dernières années.

Dans de nombreux pays, les laboratoires nationaux de métrologie ont démarré ou intensifié des activités dans ce domaine. Comme les investissements en équipements appropriés, en particulier ceux nécessaires à des mesures primaires, peuvent être considérables et que des connaissances spécialisées en chimie sont nécessaires, les laboratoires nationaux de métrologie de différents pays ont établi des collaborations étroites avec d'autres laboratoires de pointe de leur pays respectif.

L'accroissement rapide de l'intérêt pour la métrologie en chimie est certainement provoqué par le besoin du commerce et de l'industrie de disposer de mesures fiables et traçables. Les demandes de la société dans des domaines tels que la santé, la sécurité ou la protection de l'environnement ont aussi rendu nécessaires des mesures plus exactes et traçables en chimie. Les accords commerciaux, tels que ceux conclus sous l'égide de l'Organisation mondiale du commerce (OMC), et les accords entre organismes d'accréditation doivent être étayés par des mesures fiables et traçables. Il faut éviter les barrières techniques au commerce.

Dans le domaine des mesures chimiques, une énorme quantité de travail est nécessaire pour arriver à une situation plus satisfaisante. Ainsi, l'intérêt pour les activités du CCQM et de ses groupes de travail est vif et a engendré de nombreuses demandes pour obtenir, au minimum, un statut d'observateur auprès du CCQM. En parallèle, on peut observer une activité accrue dans ce domaine au sein des organisations régionales de métrologie.

Le CCQM travaille en coopération étroite avec des organisations régionales ou globales actives dans le domaine de la métrologie en chimie, telles que la

Cooperation on International Traceability in Analytical Chemistry (CITAC), l'IFCC, l'ISO-REMCO et l'UICPA.

Lors de la 20^e Conférence générale en 1995, j'ai présenté un rapport sur les premières actions et résultats du CCQM et de son prédécesseur, le Groupe de travail du Comité international sur la métrologie en chimie créé en 1992. Depuis, des progrès considérables ont été accomplis, une stratégie a été mise au point et une infrastructure d'études et de comparaisons clés a été approuvée et mise en œuvre.

Résultats des études et comparaisons

Le CCQM continue d'étudier et de discuter des méthodes primaires à appliquer, des matériaux de référence primaires et plus généralement du rôle des matériaux de référence certifiés.

Des liens ont été établis avec le Groupe de travail sur le VIM du Comité commun sur les guides en métrologie pour discuter des définitions de termes qui répondent aux besoins de la communauté des chimistes et qui soient compréhensibles par cette communauté.

Des documents et protocoles ont été établis et publiés pour décrire les méthodes primaires suivantes : spectrométrie de masse avec dilution isotopique ; coulométrie ; gravimétrie ; titrage ; et détermination de l'abaissement du point de congélation (analyse calorimétrique à compensation de puissance).

Depuis, d'autres méthodes primaires potentielles, telle que la spectroscopie à résonance magnétique nucléaire, sont à l'étude.

Les comparaisons suivantes ont été effectuées :

- Plomb dans un échantillon d'eau, laboratoire pilote : NIST (États-Unis).
Cette comparaison est en partie une répétition de l'étude effectuée aux débuts du CCQM. De meilleures directives ont été rédigées et des préparatifs plus détaillés ont été faits avant de commencer la comparaison proprement dite. Les résultats sont maintenant satisfaisants, et montrent que les onze participants sont en accord à ± 1 % près de la valeur nominale.
- Mélanges de gaz de CO, CO₂, NO, SO₂ dans l'azote et trois compositions de gaz naturel, laboratoire pilote : NMi (Pays-Bas).
Cette grande série de comparaisons est terminée. Les résultats sont satisfaisants et montrent une comparabilité entre les laboratoires nationaux de métrologie participants et une traçabilité au SI pouvant atteindre ± 1 % et souvent même meilleures d'un ordre de grandeur.

- pp'-DDE dans l'iso-octane par spectrométrie de masse avec dilution isotopique.

Les résultats à la fraction massique la plus élevée (4,74 µg/g) montrent un accord satisfaisant (à ± 1 % près de la valeur de référence) entre les dix laboratoires participants. Toutefois, à la fraction massique la plus faible (0,072 µg/g), une dispersion plus grande des résultats des laboratoires participants a été observée, six des dix laboratoires participants étaient en accord à ± 1 % près avec la valeur de référence.

Dans tous les cas, il est clair que les laboratoires doivent parvenir à une meilleure harmonisation des déclarations d'incertitudes de mesure.

Organisation des activités du CCQM

Pour organiser les activités menées par ou sous l'égide du CCQM de manière efficace et prendre en compte les conséquences du MRA, le CCQM a créé les cinq groupes de travail suivants :

- Groupe de travail sur les comparaisons clés, présidé par le NIST ;
- Groupe de travail sur l'analyse organique, présidé par le NIST ;
- Groupe de travail sur l'analyse inorganique, présidé par le Laboratory of the Government Chemist (LGC, Royaume-Uni) ;
- Groupe de travail sur l'analyse de gaz, présidé par le NMI ;
- Groupe de travail sur le pH, présidé par la PTB (Allemagne).

Groupe de travail sur les comparaisons clés

Le CCQM fait la distinction entre les études et les comparaisons clés.

Les études ne sont pas seulement des projets de recherche et développement, mais sont aussi des comparaisons préliminaires à de nouvelles comparaisons clés potentielles.

Comme le domaine de la métrologie en chimie est très vaste, le CCQM a décidé d'établir des priorités. Ainsi, seules seront définies et réalisées les comparaisons clés centrales à certaines spécialités de la chimie, qui sont intéressantes du point de vue de la métrologie et qui ont un impact important pour le commerce, l'industrie ou la société.

Le CCQM a aussi commencé à définir un programme à long terme d'études et de comparaisons clés. Les domaines couverts sont les suivants :

- *Santé* : marqueurs servant au diagnostic clinique
- *Alimentation* : résidus de pesticides, toxines dans l'alimentation, eau potable

- *Environnement* : eau, air, gaz impliqués dans le réchauffement climatique du globe, sources ponctuelles d'émission, polluants dans les sols, les sédiments ou les cendres, métaux dans les tissus biologiques, métaux toxiques dans les plastiques recyclés
- *Matériaux de haute technologie* : semiconducteurs, alliages métalliques, polymères et plastiques, catalyseurs
- *Marchandises et produits divers*
- *Aspects légaux*
- *Produits pharmaceutiques*
- *Biotechnologies*
- *Applications analytiques générales* : pureté de matériaux, solutions d'étalonnage, étalons isotopiques

Neuf comparaisons clés et vingt études sont en cours d'exécution ou prévues.

La liste des comparaisons et études proposées au CCQM est publiée dans le rapport de la 5^e session du CCQM (1999) au tableau 1 (pages 38 à 41) et la liste des comparaisons clés (K) et études pilotes (P) du CCQM, terminées, en cours ou envisagées figure au tableau 2 (pages 42 et 43).

Groupe de travail sur l'analyse organique

Au cours de l'année passée, les travaux effectués par ce groupe de travail se sont bien structurés.

Les résultats des études et des comparaisons, ainsi que l'état d'avancement des travaux ont été présentés lors de la dernière session du CCQM :

- Spectroscopie de résonance magnétique nucléaire pour l'analyse de mélanges, pouvant éventuellement servir de méthode primaire pour les composés organiques dans des mélanges liquides. Les résultats sont prometteurs et l'étude sera poursuivie.
- Les comparaisons de pp'-DDE dans l'huile de maïs ont montré un niveau d'équivalence prometteur entre les laboratoires participants, en particulier à des niveaux de concentration élevés. Des comparaisons clés de ce type, dans l'huile de foie de morue, devraient avoir lieu prochainement.
- Études sur les caractéristiques de substances organiques pures au moyen de diverses techniques de vérification de la pureté. Ces études ont été très utiles pour identifier les problèmes à résoudre dans les futures études de ce type.
- Les comparaisons sur la détermination du cholestérol dans un sérum humain ont donné des résultats satisfaisants pour l'analyse clinique, mais ils ne sont pas directement utiles dans le cadre d'une étude visant à démontrer le degré d'équivalence entre les laboratoires nationaux de métrologie. D'autres comparaisons seront organisées.

Groupe de travail sur l'analyse inorganique

Les projets dans ce domaine se sont aussi davantage structurés au cours de l'année passée.

Les résultats des études et des comparaisons, ainsi que l'état d'avancement des travaux ont été présentés lors de la dernière session du CCQM :

- L'étude des caractéristiques de substances inorganiques pures comme le NaCl, le KCl ou le $K_2Cr_2O_7$ au moyen de différentes méthodes a montré qu'il est nécessaire de formuler bien plus précisément les procédures d'analyse et de manipulation des échantillons (par exemple la procédure de séchage).

Il est aussi nécessaire de définir bien plus précisément quelles sont les méthodes utilisables pour tel composé et tel domaine, tout en tenant compte de l'usage que l'on compte faire du composé.

- La spectrométrie de masse avec dilution isotopique du cadmium et du plomb dans des échantillons d'eau douce naturelle a montré les progrès réalisés pour établir la traçabilité et l'équivalence des mesures entre les laboratoires nationaux de métrologie participants. De plus, comme cette comparaison clé est liée aux comparaisons organisées par l'IRMM auxquelles ont participé un grand nombre de laboratoires d'analyse de différents pays, elle s'avère être un bon moyen d'établir directement la traçabilité au bénéfice des laboratoires de terrain. Les résultats de ces laboratoires de terrain, toutefois, sont souvent décevants et ont montré clairement qu'il est nécessaire de renforcer la formation et l'enseignement au niveau des laboratoires secondaires de référence et des laboratoires de terrain.

Groupe de travail sur l'analyse de gaz

Ce groupe de travail a toujours été très actif et a montré que l'on pouvait obtenir de très bons résultats dans le domaine de l'analyse de gaz afin d'établir la traçabilité internationale. Il a fait part des progrès suivants :

- Les résultats de la principale étude, qui a commencé en 1993, sur l'analyse de six groupes importants de mélanges de gaz (CO, CO₂, NO et SO₂ dans l'azote et trois gaz naturels différents) ont montré un bon niveau d'accord.
- Les comparaisons de CO, CO₂ et C₃H₈ (gaz d'émission des automobiles) dans l'azote viennent de s'achever.
- Une comparaison d'éthanol dans l'air est en cours, et des comparaisons de benzène, toluène et xylène dans l'azote et dans l'air sont envisagées.
- Des études et comparaisons sur les gaz concernés par le réchauffement du globe et la qualité de l'air sont en préparation.

Groupe de travail sur le pH

Ce groupe de travail n'a effectué aucune comparaison ou étude, dans l'attente du résultat des discussions sur le pH au sein de l'UICPA. Le groupe de travail de l'UICPA sur ce sujet est maintenant parvenu à un consensus, aussi le Groupe de travail du CCQM sur le pH va-t-il débiter une comparaison clé sur la détermination du pH dans deux solutions tampons de phosphate.

Ce groupe de travail examinera aussi l'opportunité d'effectuer des comparaisons dans le domaine de la conductivité électrique de solutions.

Questions d'ordre général

Au cours des quatre dernières années le CCQM a discuté de plusieurs questions d'ordre général :

- *Vocabulaire* : Une des difficultés auxquelles le CCQM doit faire face est un problème de divergence de compréhension et de vocabulaire employé par la communauté des physiciens et celle des chimistes. Le CCQM essaie de combler ce fossé et de redéfinir, de « traduire », ou d'expliquer certains concepts tels que ceux d'étalon primaire, de méthode primaire ou de matériau de référence primaire.
- *Incertitude de mesure* : Dans toutes les comparaisons (clés), le calcul et la déclaration des incertitudes de mesure semblent constituer des questions difficiles et obscures. En conséquence, il est encore difficile d'arriver à des conclusions quant à l'équivalence entre les laboratoires nationaux de métrologie participants. C'est pourquoi le CCQM organisera un atelier spécial à l'intention de ses membres et des participants aux comparaisons, à Sèvres, à la fin de 1999.

De manière plus générale, on peut conclure que le concept d'incertitude de mesure n'est pas vraiment accepté ni même compris par la communauté des chimistes. À cet égard, les directives rédigées par l'Eurachem et le CITAC sur le calcul de l'incertitude de mesure appliqué à l'analyse chimique quantitative sont très utiles.

- *Valeur de référence d'une comparaison clé* : La signification et le rôle de la valeur de référence d'une comparaison clé et la possibilité de transférer cette valeur aux comparaisons régionales ont été discutés. Le CCQM a conclu que souvent cela ne peut être réalisé directement, ce qui signifie que, à l'exception des résultats des comparaisons clés, il faudra effectuer d'autres mesures pour assurer et démontrer les aptitudes des laboratoires nationaux de métrologie à disséminer la traçabilité. La mise en œuvre de systèmes d'assurance de qualité et l'introduction du contrôle par des pairs sont des outils utiles pour établir la confiance dans les aptitudes et compétences des laboratoires nationaux de métrologie.

- *Matériaux de référence certifiés* : Le rôle des matériaux de référence certifiés a été discuté. Il est admis en général que les matériaux primaires ou certifiés peuvent être utilisés comme étalons nationaux de mesure. Cependant, les techniques et aptitudes de mesure, telles que les méthodes primaires, doivent être étudiées de manière fondamentale pour établir la traçabilité internationale et offrir des points d'ancrage stables, comme le SI. Ceci est nécessaire pour satisfaire aux besoins croissant de manière rapide du commerce, de l'industrie et de la société dans le domaine des mesures en chimie.
- *Programme du BIPM dans le domaine de la métrologie en chimie* : Le CCQM considère qu'il est essentiel que le BIPM acquière par lui-même une connaissance fondamentale dans le domaine de la métrologie en chimie pour devenir un partenaire compétent de la communauté internationale des chimistes et aider à établir de manière claire un système mondial de traçabilité et d'équivalence des mesures en chimie. Le CCQM a donc conseillé au Comité international d'entreprendre des activités dans le domaine de la métrologie en chimie au Bureau international. Ces activités lui permettront d'acquérir les connaissances et les compétences nécessaires pour contribuer à établir les bases de la traçabilité dans ce domaine, d'adopter un point de vue pratique, d'offrir une valeur ajoutée aux laboratoires nationaux de métrologie, en étant apte à offrir des services pour étayer la traçabilité, et d'être considéré et reconnu par la communauté des chimistes comme un partenaire clé à cet égard. La création d'un laboratoire dans le domaine de l'analyse de gaz a été bien accueillie par le CCQM et est considérée comme un bon point de départ pour des développements fondamentaux ultérieurs éventuels.
- *Analyse et identification qualitatives* : Une des grandes difficultés de la chimie analytique est d'identifier ce que l'on mesure réellement, et la certitude avec laquelle on peut affirmer que le résultat de la mesure correspond bien au mesurande défini. Souvent, le mesurande n'est pas assez bien ou pas entièrement défini. Cette question restera à l'ordre du jour du CCQM pour les prochaines années.
- *Viscosité* : Plusieurs laboratoires nationaux de métrologie ont aussi suggéré d'organiser des études et des comparaisons sur la viscosité. Une réunion a été organisée en septembre 1999 au Bureau international à Sèvres pour étudier les problèmes, besoins et possibilités d'activités à venir dans ce domaine.

Le katal et le SI

Le CCQM a entériné la proposition du CCU d'adopter le nom « katal » (symbole « kat ») pour l'unité dérivée du SI mole par seconde, afin d'exprimer l'activité catalytique d'une enzyme.

La proposition originelle avait été soumise au CCU par l'IFCC et le CCQM y a ajouté la recommandation suivante : lorsque le katal est utilisé, il faut spécifier le mesurande en faisant référence au mode opératoire de mesure, lequel doit mentionner le produit indicateur de la réaction mesurée.

Le projet de résolution N (*voir* page 177) a été rédigé, qui est soumis par le CCU à l'approbation de la 21^e Conférence générale au nom des deux comités.

Projets de résolutions de la Conférence générale sur la métrologie en chimie et en biotechnologie

Au cours des années passées, on a constaté une plus grande sensibilité à la traçabilité des mesures en chimie de la part des personnes ou organismes concernés directement ou indirectement par les résultats de ces mesures. Plusieurs organisations régionales ou internationales ont porté cette question à l'ordre du jour de leurs réunions et ont publié, ou vont publier, des articles ou directives sur la traçabilité, l'équivalence, les incertitudes de mesure, la qualité et le rôle des matériaux de référence certifiés.

Parmi ces organisations, nous pouvons mentionner l'AIEA, le CITAC, l'Eurachem, l'ISO-REMCO, l'UICPA, et d'autres envisagent de le faire, comme l'Association of Official Analytical Chemists (AOAC).

La nécessité d'éliminer les barrières techniques au commerce qui sont liées aux mesures, en général dans le cadre d'accords commerciaux sous l'égide de l'OMC, demande une plus grande attention de la part des laboratoires nationaux de métrologie. En particulier les domaines de l'alimentation, des produits pharmaceutiques, de l'environnement et des matériaux de haute technologie demandent d'établir de meilleures bases, plus exactes et traçables, pour les étalons de mesure en chimie. L'impact de ces décisions sur la qualité de la vie et sur les coûts financiers pour l'environnement et la santé rend nécessaire un contrôle plus méticuleux et exact. Un système de mesure, stable à long terme et suffisamment exact, assurant la traçabilité et l'équivalence internationales, est une nécessité essentielle pour atteindre les buts fixés par la société, le commerce et l'industrie.

Cela requiert le soutien entier, efficace et coordonné des laboratoires nationaux de métrologie. Pour ne pas perdre de temps ou d'argent, il est recommandé que les laboratoires nationaux de métrologie coopèrent dès que possible avec les autres laboratoires de chimie analytique ayant des responsabilités clés dans certains domaines comme la santé, l'alimentation, l'environnement, les aspects légaux ou l'analyse chimique générale.

Les mêmes considérations s'appliquent au domaine de la biotechnologie. La société est de plus en plus consciente de l'importance en chimie de mesures exactes, adaptées et traçables au niveau international, et de l'énorme charge financière que pourraient entraîner des résultats de mesure erronés. Les

règlements sur les mesures in vitro imposent la traçabilité (par exemple en Europe). L'importance rapidement croissante de la bioscience et de la technologie pour la santé humaine, la production alimentaire, les aspects légaux de la médecine et la protection de l'environnement montrent clairement qu'une infrastructure métrologique adéquate est hautement nécessaire pour obtenir des résultats de mesure fiables fondés sur le SI. Une coopération nationale et internationale avec toutes les parties concernées est nécessaire.

Les projets de résolution J et K ont été préparé à ce sujet (*voir* page 174).

M. Bordé remercie M. Kaarls pour la présentation de son rapport et demande s'il y a des questions. M. Faber (OIML) remarque que la métrologie en chimie est une discipline nouvelle pour de nombreux laboratoires nationaux de métrologie, et invite le CCQM à être prudent avant de commencer des activités dans de trop nombreux domaines, parce que ces activités nouvelles demandent un investissement lourd. Il suggère qu'il serait préférable de répartir les activités du CCQM entre plusieurs laboratoires pour alléger la charge de travail des laboratoires nationaux de métrologie. M. Kaarls répond que la distribution du travail incombe aux gouvernements nationaux, mais il est aussi d'avis que l'engagement des autres laboratoires clés (autres que les laboratoires nationaux de métrologie) est essentiel. Il ajoute qu'il est important que les organisations régionales de métrologie soient aussi prises en considération.

M. Bordé demande si M. Kaarls a une liste de priorités ; M. Kaarls répond que les priorités sont nombreuses. La première des priorités est de commencer les comparaisons clés mentionnées dans son rapport. Le CCQM a choisi des domaines ayant un impact direct sur la société et que l'on peut espérer voir aboutir à des résultats.

Le projet de résolution J est approuvé à l'unanimité comme Résolution 10 et le projet de résolution K est approuvé avec une abstention (Afrique du Sud) comme Résolution 11 (*voir* pages 143 et 144 respectivement).

11.9 Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations

M. A.J. Wallard, président par intérim du Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations (CCAUV), présente le rapport suivant.

Lors de sa 87^e session en septembre 1998, le Comité international a décidé de créer un nouveau Comité consultatif dans le domaine de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations, sur la recommandation du groupe de travail du Comité international présidé par M. Wallard.

Le groupe de travail avait abouti aux conclusions suivantes :

- L'activité industrielle, scientifique et médicale dans ces domaines ne cesse de croître au niveau international.
- Les consultations engagées avec les parties intéressées dans les laboratoires nationaux de métrologie, avec l'ISO et avec la CEI révèlent une volonté de voir le Bureau international coordonner ces activités.
- Les laboratoires nationaux de métrologie sont bien disposés à coordonner leurs activités de recherche.
- Cinq comparaisons clés devraient être mises en œuvre.
- Les laboratoires nationaux de métrologie sont très favorables à la création de ce nouveau Comité consultatif.
- Un numéro spécial de *Metrologia* consacré à l'acoustique, aux ultrasons et aux vibrations serait bien accueilli.

Le Comité international a approuvé ces conclusions et a décidé de créer le CCAUV. Ce dernier a tenu sa première session en juillet 1999 sous la présidence de M. Wallard, Mme Allisy-Roberts (BIPM) en étant la secrétaire exécutive. Les participants ont fait part de leur intérêt pour divers sujets et discuté des critères d'appartenance. Il a été demandé au directeur du Bureau international d'écrire aux laboratoires nationaux de métrologie pour savoir s'ils souhaitent devenir membres ou observateurs du CCAUV, afin que le Comité international dresse la liste des membres de ce nouveau Comité consultatif.

Les cinq comparaisons clés proposées par le groupe de travail du Comité international ont été entérinées et une sixième est prévue :

- CCAUV.A-K1 : comparaison de mesures de pression acoustique dans l'air entre 63 Hz et 8 kHz ;
- CCAUV.A-K2 : comparaison de mesures de pression acoustique dans l'air à des fréquences spécifiques (20 Hz, 50 Hz, 63 Hz) ;
- CCAUV.W-K1 : comparaison de mesures de pression acoustique dans l'eau au moyen d'hydrophones, entre 1 kHz et 500 kHz ;
- CCAUV.U-K1 : comparaison de mesures de puissance d'ultrasons à différents niveaux ;
- CCAUV.U-K2 : comparaison de mesures de puissance d'ultrasons au moyen d'hydrophones à membrane entre 1 MHz et 15 MHz ;
- CCAUV.V-K1 : comparaison d'accéléromètres piézo-électriques entre 40 Hz et 5 kHz.

Le domaine est donc bien couvert et la participation régionale est satisfaisante que ce soit au niveau des laboratoires nationaux de métrologie ou, pour les mesures acoustiques dans l'eau, des laboratoires désignés qui détiennent les étalons nationaux.

Il y a eu un accord général sur la manière dont les organisations régionales de métrologie pourraient compléter les comparaisons clés du Comité international. Les participants ont aussi identifié les comparaisons que les organisations régionales de métrologie pourraient soumettre à l'analyse du CCAUV afin d'en inclure les résultats, le cas échéant, dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés.

Des liens renforcés ont été établis avec la CEI et l'ISO par la nomination de délégués invités à faire la liaison entre le CCAUV et les comités techniques concernés de la CEI et de l'ISO.

La prochaine session du CCAUV devrait se tenir en 2001, mais le Groupe de travail sur les comparaisons clés pourrait se réunir avant cette date pour discuter des comparaisons clés achevées.

Ce rapport ne fait l'objet d'aucun commentaire.

11.10 Comité consultatif des unités

M. I.M. Mills, président du Comité consultatif des unités (CCU), présente son rapport ainsi que les projets de résolution L, sur le neper (*voir* page 176), et N, sur le katal (*voir* page 177).

Le CCU s'est réuni trois fois au cours des quatre dernières années, en février 1995, en avril 1996 et en septembre 1998. Durant cette période, l'événement le plus notable pour le CCU a été la préparation et la publication de la 7^e édition de la brochure sur le SI, publication officielle du Bureau international. La révision de cette brochure, tous les six ou sept ans, est une responsabilité capitale du CCU. La 7^e édition a été publiée en juin 1998, elle remplace la 6^e édition publiée en 1992 et les représentants à la Conférence générale en ont reçu un exemplaire.

Les réunions de février 1995 et d'avril 1996 ont été principalement consacrées à la préparation de la nouvelle édition de la brochure sur le SI. Comme les deux éditions précédentes, elle est bilingue français-anglais. La nouvelle édition inclut toutes les résolutions de la Conférence générale et les recommandations du Comité international approuvées depuis 1991, et aussi certaines autres modifications apportées par le CCU.

Certains changements de style ont été introduits afin de rendre la consultation de la brochure plus conviviale aux utilisateurs internationaux. Le texte consacré à l'introduction historique et à la discussion sur le SI dans son contexte a été étendu, avec maintenant une note sur l'interprétation des unités du SI dans le cadre de la relativité générale. Une section consacrée aux unités des grandeurs sans dimension a été ajoutée. Le chapitre consacré aux unités en dehors du SI a été revu en profondeur : après avoir souligné les avantages qu'il y a à utiliser les unités du SI, la brochure donne des informations sur les unités en dehors du SI sans nécessairement désapprouver leur

utilisation. Une nouvelle classification des unités en dehors du SI et qui peuvent être utilisées avec le SI a été adoptée : les unités en usage avec le SI [Tableau 6] (comme la minute et l'heure en tant qu'unités de temps), les unités en usage avec le SI dont la valeur est obtenue expérimentalement [Tableau 7] (comme l'électronvolt), les unités en usage avec le SI et répondant à des besoins spécifiques [Tableau 8] (comme le mille marin, l'ångström et le barn). Il est préférable d'éviter d'employer les autres unités en dehors du SI et d'intérêt historique [Tableaux 9 et 10]. Pour la première fois, le point est admis comme séparateur décimal dans les textes en anglais, alors que la virgule est employée en français. Un chapitre entièrement nouveau a été introduit (Chapitre 5) pour décrire les règles d'écriture des noms et symboles des grandeurs et unités, règles fondées principalement sur les recommandations de l'ISO/TC 12 et sur la norme ISO 31 : *Grandeurs et unités*.

Lors de la réunion de septembre 1998, de nouvelles propositions soumises au CCU par divers organismes, et susceptibles d'entraîner des changements au SI, ont été discutées. Le CCU a présenté deux d'entre elles au Comité international pour approbation ; elles sont maintenant soumises à l'approbation de la Conférence générale en tant que projets de résolution L et N. Il s'agit de recommandations relatives à deux nouveaux noms spéciaux d'unités cohérentes dérivées du SI, le neper (une unité sans dimension égale à un, utilisée pour exprimer la valeur logarithmique du décrémentation ou de l'atténuation) et le katal (l'unité mole par seconde, utilisée pour exprimer la valeur de l'activité catalytique). Le CCU recommande l'usage du neper, car il est illogique de ne pas l'introduire dans le SI alors que l'on accepte le radian comme unité du SI, et celui du katal parce qu'il est couramment utilisé en chimie clinique depuis de nombreuses années : l'exclure de la liste des unités du SI pourrait représenter un danger pour la santé humaine, comme c'est le cas pour le becquerel, le gray et le sievert.

Les questions suivantes ont été discutées lors de la session de 1998, mais ni le CCU ni le Comité international n'ont décidé d'y donner suite.

- Le CCU a examiné l'éventualité de créer de nouveaux préfixes SI, dont le domaine s'étend actuellement entre 10^{24} et 10^{-24} , pour atteindre 10^{48} et 10^{-48} . Il a cependant admis que ces préfixes seraient rarement utilisés, et que les avantages éventuels d'une telle extension ne sont pas suffisants au vu des risques de confusion qu'elle pourrait engendrer.
- Le CCU a examiné la possibilité de changer les symboles des préfixes kilo, hecto et déca (k, h, et da) en K, H et D.
- Le CCU a examiné la possibilité de donner un nom et un symbole au nombre un (l'uno, symbole U, a été proposé) pour permettre l'usage de préfixes associés à l'unité des grandeurs sans dimension (comme microuno, μU , à la place du ppm qui est largement utilisé).
- Le CCU a étudié la possibilité de réviser la rédaction des définitions des sept unités de base du SI, afin d'en unifier la forme et de la rendre

conforme à un mode d'expression moderne, plutôt que conserver les définitions historiques qui sont exprimées de façon différente d'une unité de base à l'autre.

- Le CCU a finalement décidé de ne rien changer pour le moment, mais qu'il continuera à examiner ces questions. La raison en est que le CCU pense qu'il faut apporter le moins de changements possible au SI, tant que ce n'est pas indispensable. Le SI est d'importance mondiale, et y apporter souvent des changements mineurs risque d'engendrer la confusion chez les nombreux utilisateurs.

Le projet de résolution N est présenté au nom du CCU et du CCQM. M. Mills dit que le CCU a reçu de nombreuses propositions de noms spéciaux pour des unités dérivées. Le CCU a été convaincu de recommander l'adoption du katal parce que cette unité est largement utilisée pour des applications médicales ; le fait d'interdire son emploi pourrait occasionner des difficultés pour les techniciens du milieu médical et serait source de danger éventuel pour la santé humaine. De plus, son adoption encouragera la communauté médicale à utiliser le SI (*voir* projet de résolution K, page 174).

M. Plantenga (Pays-Bas) dit qu'il considère le katal comme une adjonction utile au SI, mais demande pourquoi la recommandation limite son usage aux domaines de la biochimie et de la médecine. M. Mills est aussi d'avis que le katal pourrait être utilisé pour d'autres applications, notamment la cinétique chimique, mais rappelle les conseils du CCU et du CCQM de limiter son usage aux applications médicales. M. Quinn ajoute, qu'en général, il est préférable d'utiliser les unités de base du SI – dans ce cas mol s^{-1} – plutôt que le katal. M. Blevin fait un parallèle avec d'autres noms spéciaux adoptés dans le SI pour des grandeurs dérivées liées aux rayonnements ionisants, et M. Carneiro (Danemark) ajoute qu'il est favorable à l'utilisation de noms spéciaux, dans des circonstances particulières et dans un but spécifique qui doit être identifié quand les unités sont proposées.

Après des modifications rédactionnelles mineures à la section « décide » pour tenir compte du point de vue selon lequel l'usage du katal ne doit pas être limité exclusivement à la médecine, le projet de résolution N est adopté comme Résolution 12 (*voir* page 145), avec deux abstentions (Italie et Pologne).

M. Mills présente ensuite le projet de résolution L sur le neper et le bel (*voir* page 176). Il explique que, dans les expressions décrivant par exemple l'affaiblissement d'un oscillateur harmonique telles que

$$f(t) = \exp(-\gamma t) \cos(\omega t) = \text{Re} [\exp(-\gamma t + i\omega t)],$$

les grandeurs γt et ωt sont sans dimension. Pour exprimer la valeur de ces grandeurs, il est cependant habituel de leur affecter les unités « neper » et « radian » respectivement, même si, les grandeurs étant sans dimension, le neper et le radian sont donc en fait égaux à un. Le neper est donc utilisé pour exprimer la valeur de la décroissance logarithmique de grandeurs de champ,

en utilisant des logarithmes naturels, et le radian est utilisé pour exprimer la valeur de l'angle, argument des grandeurs trigonométriques. Le neper, bien sûr, est utilisé depuis de nombreuses années, même si son usage est peu fréquent. L'unité de décroissance logarithmique la plus fréquemment utilisée est le bel, ou son sous-multiple le décibel, fondé sur des logarithmes de base dix, et généralement utilisé pour exprimer les grandeurs de puissance.

M. Mills explique que le CCU considère qu'il est illogique d'inclure le radian en tant qu'unité du SI et d'exclure le neper, alors que ces deux unités interviennent de la même manière dans l'argument de la fonction exponentielle d'équations similaires à celle mentionnée ci-dessus. Le CCU pense aussi que le neper, mais pas le bel, est une unité cohérente du SI pour exprimer la valeur de la décroissance logarithmique, tout comme le radian, mais pas le degré, est l'unité cohérente du SI pour exprimer la valeur des angles. Ce projet de résolution a aussi été approuvé par le Comité international à sa session de 1998.

Ce projet est ensuite discuté par la Conférence générale. Des doutes sont exprimés à propos de certains aspects de la résolution. M. Giacomo, directeur honoraire du BIPM, souligne que ni le neper ni le bel ne sont des unités dérivées du SI au sens habituel, car ils ne peuvent pas être définis comme des combinaisons algébriques des unités de base du SI classiques, à la différence du radian et du stéradian. M. Giacomo observe aussi qu'en pratique les noms neper et bel, qui sont tous deux utilisés pour exprimer la valeur d'un nombre, sont en fait utilisés pour véhiculer de l'information sur la nature de la grandeur en question, parce que les noms utilisés pour les grandeurs ne mentionnent pratiquement jamais le fait qu'un logarithme est utilisé, ni la base de ce logarithme. Les unités ne doivent pas être utilisées de cette manière. Il suggère aussi que, bien que l'emploi de la base « e » soit plus naturel en liaison avec la fonction exponentielle utilisée pour décrire les phénomènes physiques, l'utilisation de la base dix pourrait être considérée comme plus naturelle pour exprimer la valeur de nombres.

Le président de la Conférence, M. Bordé, exprime aussi des doutes quant à ce projet de résolution, notant que dans des applications spectroscopiques comme l'affaiblissement d'un oscillateur harmonique, la grandeur ω apparaît comme la fréquence angulaire et γ comme la demi-largeur de la raie spectrale correspondante. Ceci suggère que l'unité utilisée pour exprimer les valeurs de ω et de γ devrait en fait être la même alors que ω et γ sont exprimés l'un en radian par seconde et l'autre en neper par seconde respectivement, comme le suggère la résolution.

Considérant les doutes exprimés lors de la discussion, M. Mills suggère qu'il serait préférable de retirer le projet de résolution pour le moment, et de l'étudier plus en détail. Il souligne qu'il pense encore, et le CCU également, que le neper devrait finir par être adopté comme unité du SI, mais il ne souhaite pas hâter l'adoption de la résolution pour le moment alors qu'un

certain nombre de délégués à la Conférence générale ont exprimé des réserves à son sujet.

La Conférence accepte cette proposition et le projet de résolution L est retiré.

12 Programme de travaux futurs au BIPM

M. T.J. Quinn, directeur du BIPM, présente un programme détaillé pour les travaux qui seront effectués au BIPM dans les années 2001 à 2004.

Le texte du programme proposé par le Comité international est reproduit à l'annexe B (voir pages 183 à 207).

13 Dotation annuelle du BIPM

13.1 Rapport sur la réunion du Groupe de travail sur la dotation

M. Blevin annonce que le Groupe de travail sur la dotation s'est réuni le mercredi 13 octobre au matin. Il était composé de représentants de l'Allemagne, de l'Argentine, du Canada, de la Chine, du Danemark, des États-Unis, de la France, de l'Italie, du Japon, du Royaume-Uni, de la Fédération de Russie, de Singapour et de la République tchèque.

13.2 Projet de résolution M

Le Groupe de travail sur la dotation a longuement discuté de la situation financière du BIPM, de son programme de travail et de ses projets pour l'avenir. Le projet de résolution M sur la dotation du BIPM pour les années

2001-2004 (*voir* page 180) a été étudié avec soin. Le Comité international proposait de maintenir la dotation en valeur réelle au niveau adopté par la 20^e Conférence générale pour l'an 2000. Le projet de résolution demande une augmentation budgétaire de 2 % par an pour tenir compte de l'inflation.

Bien que les représentants des États membres participant au groupe de travail aient déclaré ne pas vouloir voter contre l'augmentation de la dotation proposée dans le projet de résolution M lorsqu'elle serait soumise au vote de la Conférence générale, le groupe de travail a néanmoins considéré que l'augmentation de 2 % demandée au titre de l'inflation était un peu trop élevée au regard des récentes prévisions économiques, et qu'une augmentation de 1,5 % serait plus appropriée. Le Groupe de travail recommande donc à la Conférence générale une version modifiée du projet de résolution M, fondée sur une augmentation de 1,5 % au lieu de 2 %. Le groupe de travail est favorable au remplacement du franc-or par l'euro. Dans le projet modifié, les dotations sont exprimées en euros aussi bien qu'en francs-or, selon la recommandation du groupe de travail.

13.3 Mise à la disposition du BIPM de membres du personnel des laboratoires nationaux de métrologie

Le groupe de travail suggère que certains laboratoires nationaux de métrologie, en particulier les plus grands d'entre eux, pourraient être disposés à mettre à la disposition du BIPM des membres de leur personnel scientifique en qualité de stagiaires, principalement à leurs propres frais.

13.4 Projet de résolution C

Le groupe de travail approuve à l'unanimité le point de vue du Comité international selon lequel tous les États membres de la Convention du Mètre, actuels ou passés, en retard sur le paiement de leur contribution ne pourront devenir Associés à la Conférence générale qu'après avoir payé l'intégralité de leurs arriérés de paiement.

13.5 Vote du projet de résolution M

Le projet de résolution M est adopté comme Résolution 13 (*voir* page 146) sans vote contre et avec deux abstentions (Allemagne et États-Unis).

M. Göbel, dit, au nom de la délégation allemande, que son pays est très satisfait du travail effectué par le BIPM depuis la précédente Conférence générale ainsi que du programme de travaux futurs présenté par le directeur du BIPM. Toutefois, le Gouvernement de l'Allemagne a décidé que sa contribution à

toutes les organisations internationales et intergouvernementales devait être maintenue à un niveau constant en valeur réelle, aussi la délégation de l'Allemagne est-elle obligée de s'abstenir de voter en faveur du projet de résolution M. M. Göbel confirme que le Gouvernement de l'Allemagne continue cependant à soutenir les activités du BIPM.

De même, Mme K. Brown explique que la législation actuelle oblige le Gouvernement des États-Unis à ne pas augmenter, en francs constants, sa participation au financement des organisations internationales. Cette politique s'applique à toutes les organisations internationales, y compris aux organisations scientifiques et techniques spécialisées telles que le BIPM. Malgré son abstention lors du vote du projet de résolution M, la délégation des États-Unis fait part du soutien de son Gouvernement au programme de travail du BIPM.

14 Propositions des délégués

M. Kovalevsky rappelle aux participants que la Convocation prie les États membres de faire connaître au Comité international au moins six mois à l'avance leurs vœux ou les propositions qu'ils souhaitent présenter à la Conférence générale. Ainsi le Comité international doit-il se conformer à la décision de la 9^e Conférence générale (Résolution 10, 1948) : « 1) Les vœux ou propositions ainsi déposés seront transmis par le bureau du Comité à tous les États adhérents à la Convention, au moins quatre mois avant l'ouverture de la Conférence, afin que MM. les délégués puissent recevoir les instructions et pouvoirs nécessaires ; 2) Tout autre vœu ou proposition ne sera présenté à la Conférence qu'à condition que le Comité ait eu le temps nécessaire de l'étudier et l'aura approuvé. »

M. Kovalevsky dit que les États membres n'ont déposé aucune proposition officielle, mais qu'il souhaite néanmoins soumettre trois points à discussion.

14.1 Célébration du 125^e anniversaire de la Convention du Mètre

En mai 2000 aura lieu le 125^e anniversaire de la Convention du Mètre et le Comité international souhaite marquer cette occasion en organisant une journée de colloque pendant laquelle des exposés seront donnés par des

personnes ayant reçu le prix Nobel pour leurs travaux qui ont contribué aux progrès de la métrologie. L'Académie des sciences de Paris a offert d'héberger cet événement, conjointement au CIPM. Pour faciliter l'organisation pratique de cette journée, le Comité international suggère que la date de cette célébration coïncide avec celle de la réunion du Comité international, et qu'une réunion des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie des États membres de la Convention du Mètre ait lieu au même moment. Les réunions se tiendront pendant la semaine du 16 au 20 octobre 2000. Le ministère des Affaires étrangères de France offrira une réception aux participants au colloque.

14.2 Création d'une journée internationale de la métrologie

Le Comité international a décidé que le 20 mai serait la Journée mondiale de la métrologie, journée qui figurera au registre des journées mondiales. M. Kovalevsky encourage les laboratoires nationaux de métrologie à faire de leur mieux ce jour-là pour promouvoir leurs activités métrologiques.

14.3 Recherche de candidats pour remplacer M. T.J. Quinn au poste de directeur du BIPM, lors de son départ à la retraite à la fin de l'année 2003

M. Kovalevsky rappelle aux délégués que, selon les termes de la Convention du Mètre, le directeur du BIPM est nommé par le Comité international. Il explique comment le Comité international entend procéder au recrutement du nouveau directeur qui remplacera M. Quinn lors de son départ à la retraite à la fin de l'année 2003. Il appelle les délégués à faire circuler largement la proposition de recrutement, selon laquelle les candidatures doivent être déposées avant le 15 avril 2000. Un jury composé du bureau du Comité étudiera les candidatures et fera un rapport au Comité international lors de sa prochaine session (en octobre 2000), date à laquelle le choix du candidat sera arrêté par le Comité international.

15 Renouvellement par moitié du Comité international

Conformément aux articles 7 (1875) et 8 (1921) du Règlement annexé à la Convention du Mètre, la Conférence générale doit procéder au renouvellement par moitié des membres du Comité international par vote à bulletin secret. Les membres sortants (ceux qui ont été cooptés provisoirement depuis la précédente Conférence générale afin de pourvoir les sièges vacants) figurent en premier sur la liste ; si leur nombre ne suffit pas, d'autres membres doivent être tirés au sort parmi les membres restants du Comité international.

Avant de procéder au vote, M. Quinn fait quelques remarques sur les règles relatives à la composition et aux élections au Comité international, et sur la pratique suivie par le Comité pour choisir des candidats. Il rappelle tout d'abord les règles figurant dans la Convention du Mètre.

15.1 Règles de la Convention du Mètre relatives à la composition du Comité international

M. Quinn rappelle les remarques faites par M. Kovalevsky dans son rapport au sujet des règles de la Convention du Mètre relatives à la composition du Comité international : chacun des dix-huit membres doit être de nationalité différente ; lorsqu'un siège est vacant par suite du décès ou de la démission d'un membre du Comité, les membres restants sont appelés à élire par correspondance un nouveau membre, cette élection doit être entérinée par un vote lors de la Conférence générale suivante.

15.2 La situation actuelle

La distribution actuelle des membres du Comité international est montrée au tableau ci-dessous. Les informations figurant dans chaque colonne du tableau sont les suivantes :

- A. Organisation régionale de métrologie ;
- B. Nombre d'États membres de chaque région qui sont membres de l'Organisation régionale de métrologie ;
- C. Dotation globale des États membres de chaque région, en pourcentage de la dotation totale du BIPM ;
- D. Nombre de membres du Comité international par région et, entre parenthèses, pourcentage par rapport à la totalité des membres ;

E. Dotation des États membres dont un ressortissant est membre du Comité international, en pourcentage de la dotation totale.

Ne figurent pas dans ce tableau le Cameroun, la République populaire démocratique de Corée, la République dominicaine, ni l'Iran. Sous le sigle SIM sont regroupés les sous-régions couvertes par NORAMET et SURAMET qui regroupent tous les États membres du continent américain. Il se peut que nos informations ne soient plus à jour en ce qui concerne certains États membres d'une ou deux organisations régionales de métrologie, mais cela n'affecte pas vraiment l'information globale contenue dans ce tableau.

Comme indiqué dans le rapport du président (section 6.2), presque la moitié des membres ont changé depuis 1995 et la quasi-totalité depuis 1990.

Tableau relatif à la composition du Comité international

A	B	C	D	E
Organisation régionale de métrologie	Nombre d'États membres	Dotation (% du total)	Nombre de membres du CIPM/ et (% du total)	Dotation des États membres représentés au CIPM (% du total)
EUROMET	19	54	7 (39)	40
COOMET	3	3,2	1 (6)	2,2
SIM	8	20	4 (22)	18
NORAMET	3	15	2 (11)	14
SURAMET	5	5	2 (11)	4
APMP	10	18	5 (28)	15
SADCMET	1	0,6	0	0
MENAMET	3	1,7	1 (6)	0,66

Pour résumer sa présentation, M. Quinn tire deux conclusions principales : tout d'abord la composition du Comité international représente bien les États membres en termes de distribution géographique et de contribution financière, ensuite les membres ne restent pas suffisamment longtemps au Comité. Comme M. Kovalevsky, M. Quinn est préoccupé par le fait que les membres du Comité ne restent pas suffisamment longtemps, ce qui risque d'occasionner des difficultés pour le bon fonctionnement du Comité international et de ses Comités consultatifs.

Les membres suivants (les huit nouveaux membres cooptés depuis la 20^e Conférence générale et un neuvième tiré au sort lors de la 88^e session du Comité international en octobre 1999) sont soumis à élection ou ré-élection par la 21^e Conférence générale : MM. E.O. Göbel, L.K. Issaev, S. Leschiutta, O. Lounasmaa, Myung Sai Chung, H. Ugur, J. Valdés, R. VanKoughnett et A.J. Wallard.

Le dépouillement est confié à deux scrutateurs : Mme Serre (France) et M. Castelazo (Mexique). Les neuf membres sont réélus à une large majorité. Sept voix ont été attribuées à d'autres candidats : M. Boháček (République tchèque), 1 vote ; M. de Almeida Farinha (Portugal), 1 vote ; M. Carneiro (Danemark), 4 votes ; et M. García San Román (Espagne), 1 vote.

16 Vote des résolutions

Le projet de résolution A est adopté comme Résolution 1 avec une abstention (Nouvelle-Zélande).

Le projet de résolution B est adopté comme Résolution 2 à l'unanimité.

Le projet de résolution C est adopté comme Résolution 3 avec une abstention (Espagne).

Le projet de résolution D est adopté comme Résolution 4 à l'unanimité.

Le projet de résolution E est adopté comme Résolution 5 à l'unanimité.

Le projet de résolution F est adopté comme Résolution 6 avec une abstention (Espagne).

Le projet de résolution G est adopté comme Résolution 7 à l'unanimité.

Le projet de résolution H est adopté comme Résolution 8 à l'unanimité.

Le projet de résolution I est adopté comme Résolution 9 à l'unanimité.

Le projet de résolution J est adopté comme Résolution 10 à l'unanimité.

Le projet de résolution K est adopté comme Résolution 11 avec une abstention (Afrique du Sud).

Le projet de résolution L est retiré.

Le projet de résolution M est adopté comme Résolution 13 avec deux abstentions (États-Unis et Allemagne).

Le projet de résolution N est adopté comme Résolution 12 avec deux abstentions (Italie et Pologne).

Le texte des Résolutions figure aux pages 133-146.

17 Questions diverses

M. Castelazo (Mexique) intervient au sujet du séparateur décimal dans les textes en anglais : le point ou la virgule ? Il note qu'en 1997 le Comité international avait décidé d'utiliser le point comme séparateur décimal dans les textes en anglais publiés par le BIPM. Il remarque que l'OMC a décidé de suivre dans la mesure du possible les règles internationales, et la norme ISO 31 recommande d'utiliser uniquement la virgule. Cette divergence occasionne beaucoup de confusion et il suggère qu'il faudrait peut-être autoriser à utiliser au choix le point ou la virgule comme par le passé, tant qu'aucune ponctuation (autre que l'espace) n'est insérée entre les groupes de trois chiffres. M. Quinn répond que les discussions sur ce point sont en cours au sein de l'ISO TC/12.

En réponse à une question de M. Schwitz (Suisse), M. Blevin confirme que les unités en dehors du SI que sont le bel et le décibel ne sont pas affectées par la décision de la Conférence générale de retirer le projet de résolution L sur le neper, et qu'elles peuvent toujours être employées avec le Système international (*voir* le tableau 6 de la brochure sur le SI pour plus de détails).

Enfin, M. Quinn dit, qu'après la réunion des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie de février 1998, le BIPM a fait enregistrer les deux logos du BIPM au titre du droit d'auteur.

17.1 Visite du Bureau international des poids et mesures

Les délégués à la Conférence générale ont été invités à une visite des laboratoires du Bureau international des poids et mesures, le mercredi 13 octobre 1999. Il leur a ainsi été possible de visiter les laboratoires, d'examiner les projets et les équipements, et de discuter avec les physiciens qui leur ont présenté leurs travaux.

17.2 Visite du dépôt des prototypes métriques : Procès-verbal

Le 13 octobre 1999, à 16:00, en présence du président du Comité international des poids et mesures, du directeur du Bureau international des poids et mesures et du représentant du conservateur des Archives nationales, il a été procédé à la visite du dépôt des prototypes métriques internationaux du Pavillon de Breteuil.

On avait réuni les trois clés qui ouvrent le dépôt : celle qui est confiée au directeur du Bureau international, celle qui est déposée aux Archives natio-

nales, à Paris et que Madame Arnauld, directeur des Archives nationales, avait apportée, celle enfin dont le président du Comité international a la garde.

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

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

<i>température actuelle :</i>	22,25 °C
<i>température maximale :</i>	23,50 °C
<i>température minimale :</i>	20,50 °C
<i>état hygrométrique :</i>	60 %

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

<i>Le directeur</i>	<i>Pour le conservateur</i>	<i>Le président</i>
<i>du BIPM,</i>	<i>des Archives nationales,</i>	<i>du CIPM,</i>
<i>T.J. Quinn</i>	<i>Mme M.P. Arnauld</i>	<i>J. Kovalevsky</i>

17.3 Arrangement de reconnaissance mutuelle

L'arrangement de reconnaissance mutuelle a été signé le 14 octobre 1999 par les directeurs des laboratoires nationaux de métrologie des États membres de la Convention du Mètre.

18 Clôture de la Conférence générale

Le président de la Conférence clôt la réunion en remerciant l'administrateur du Collège de France d'avoir mis ses locaux à la disposition de la Conférence. Il remercie aussi M. W.R. Blevin, en qualité de secrétaire de la Conférence, et tous les membres du bureau du Comité ; M. T.J. Quinn et l'ensemble du personnel du BIPM, en particulier Mme F. Joly et le secrétariat du BIPM ; le ministère des Affaires étrangères de France et Mme Serre ; tous les intervenants, et en particulier les présidents des Comités consultatifs pour la présentation de leur rapport, ainsi que les interprètes. Ce fut un grand plaisir pour lui d'assister à la Conférence et d'importantes décisions ont été prises. Il rappelle aux délégués que la prochaine Conférence générale se réunira dans quatre ans, en octobre 2003.

Au nom de tous les participants, M. Kovalevsky remercie à son tour le président de la Conférence, M. Bordé, pour l'excellente manière dont il a présidé la réunion.

**Résolutions adoptées par la
21^e Conférence générale
des poids et mesures (1999)**

■ Métrologie : besoins à long terme

Résolution 1

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- la Résolution 11 de la 20^e Conférence générale, qui a demandé au Comité international d'étudier les besoins à long terme relatifs à la métrologie et d'en rendre compte,
- l'étude qui a été achevée en 1997 à la suite de larges consultations internationales,
- le rapport qui en a résulté, intitulé *Besoins nationaux et internationaux dans le domaine de la métrologie : les collaborations internationales et le rôle du BIPM*, remis par le Comité international en 1998 aux Gouvernements des États membres,

accueille favorablement les nombreuses décisions du Comité international consécutives à cette étude, et en particulier

- l'élargissement progressif des missions des Comités consultatifs pour couvrir les principaux domaines de la métrologie où la collaboration entre les laboratoires nationaux de métrologie est importante, non seulement en physique et en ingénierie mais également dans d'autres disciplines telles que la chimie et la biotechnologie,
- le renforcement du rôle des Comités consultatifs et l'admission d'observateurs aux réunions afin de permettre à un plus grand nombre d'États membres de participer,
- l'accent mis sur l'évaluation et la publication du degré d'équivalence des étalons nationaux de mesure des États membres et la mise en place d'un arrangement de reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage et de mesurage émis par les laboratoires nationaux de métrologie,
- la mise en place de réunions régulières avec les directeurs des laboratoires nationaux de métrologie des États membres,
- les déclarations faites par le Comité international au sujet du rôle du BIPM au cours des premières décennies du vingt et unième siècle,
- la collaboration plus étroite du BIPM avec les organismes internationaux concernés, plus particulièrement les organisations régionales de métrologie, l'International Laboratory Accreditation Cooperation et l'Organisation internationale de métrologie légale,
- les progrès considérables déjà accomplis par le Comité international dans la mise en œuvre de ses décisions,

prend note de la discussion dans le rapport du Comité international des engagements financiers à long terme demandés aux États membres,

remercie les nombreux organismes et les personnes qui ont apporté leur contribution à cette étude et au rapport du Comité international.

■ **Reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage et de mesurage émis par les laboratoires nationaux de métrologie**

Résolution 2

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- la Résolution 2 de la 20^e Conférence générale concernant la traçabilité des mesures au niveau mondial,
- le besoin rapidement croissant de démontrer l'équivalence au niveau international des mesures et des résultats des essais liés au commerce,
- le nombre croissant d'arrangements et d'accords de reconnaissance mutuelle entre les services d'étalonnage et d'essais négociés entre divers États,
- que les services d'étalonnage et d'essais de chaque État dépendent d'un laboratoire national tant pour les étalons de mesure que pour leur traçabilité au Système international d'unités (SI),

reconnaît que la reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure et des services d'étalonnage des laboratoires nationaux de métrologie est nécessaire pour fournir le fondement de la reconnaissance mutuelle généralisée aux services nationaux d'étalonnage et d'essais,

accueille favorablement

- l'initiative prise par le Comité international de rédiger un arrangement de reconnaissance mutuelle relatif aux étalons nationaux de mesure et aux certificats d'étalonnage et de mesurage émis par les laboratoires nationaux de métrologie,
- la décision des États membres qui ont déjà donné autorité pour signer cet arrangement au directeur du laboratoire national de métrologie de leur pays qu'ils ont désigné,

invite

- tous les autres États membres de la Convention du Mètre à participer à cet arrangement en conférant l'autorité nécessaire au directeur du laboratoire national de métrologie de leur pays qu'ils auront désigné pour signer cet arrangement,

- tous les États membres à déployer tous leurs efforts pour mettre en œuvre l'arrangement et à encourager les autres autorités de leur pays à reconnaître l'équivalence ainsi démontrée des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage et de mesurage,
- tous les États à considérer cet arrangement comme fondement à la reconnaissance des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage et de mesurage des laboratoires nationaux de métrologie signataires.

■ Associés à la Conférence générale des poids et mesures

Résolution 3

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant que

- l'infrastructure mondiale de mesure, fondée sur le Système international d'unités (SI) utilisé dans presque tous les domaines de la société moderne, repose sur l'application universelle des décisions de la Conférence générale des poids et mesures,
- tous les États, et pas uniquement ceux qui sont membres de la Convention du Mètre, s'engagent dans des mesures liées au commerce et qui doivent être traçables au SI,
- les États qui ne sont pas membres de la Convention du Mètre sont à l'heure actuelle exclus des activités de cette Convention,
- les États membres de la Convention du Mètre soutiennent le système de mesure mondial en consacrant des ressources financières considérables au Bureau international des poids et mesures (BIPM) et à leur propre système national de mesure,
- de nombreux États plus petits peuvent avoir des difficultés à dégager des sommes suffisantes pour assumer le coût de leur appartenance à la Convention du Mètre,

décide

- d'assumer la responsabilité de fournir aux États et entités économiques qui ne sont pas encore membres de la Convention du Mètre les moyens d'établir la liaison au système de mesure mondial de manière à assurer la reconnaissance de la traçabilité de leurs mesures au SI,
- qu'une liaison importante peut être assurée par la participation à l'arrangement de reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure mis en place par le Comité international,

- que la participation à cet arrangement pour un tel État ou entité économique devrait être réalisée par l'association de ses laboratoires nationaux de métrologie à une Organisation régionale de métrologie membre du Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM,

et **décide** en conséquence

- d'inviter ces États et entités économiques à assister à la Conférence générale à titre d'associés, établissant ainsi la liaison avec les États membres de la Convention du Mètre, liaison qui leur est nécessaire pour participer à l'arrangement de reconnaissance mutuelle,
- que les États associés et les entités économiques associées à la Conférence générale participent à la Conférence générale en nommant des observateurs n'ayant pas le droit de vote,
- que les États associés et entités économiques associées acquitteront une souscription annuelle au BIPM pour couvrir les coûts des services que le Comité international des poids et mesures pourra leur fournir ; la souscription annuelle de chaque État associé ou entité économique associée sera déterminée à partir de sa contribution aux Nations unies, comme pour les États membres, mais avec un minimum égal à 0,05 % de la dotation annuelle du BIPM,
- qu'un État ou entité économique souhaitant devenir associé(e) peut le devenir sur demande adressée au directeur du BIPM directement, ou par l'intermédiaire de son ambassade à Paris, et en s'acquittant de la première annuité de sa souscription,
- qu'un État associé ou une entité économique associée n'ayant pas réglé sa souscription pendant trois années cesse d'être associé(e) ; il ou elle peut le redevenir en acquittant ces arriérés.

■ **Nécessité d'utiliser les unités du SI dans les recherches sur les ressources terrestres, l'environnement, la sécurité humaine et les études connexes**

Résolution 4

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant que

- les effets sur la géosphère et la biosphère des activités industrielles et commerciales et de nombreuses autres activités humaines ainsi que des phénomènes naturels, et leurs conséquences sur la santé et le bien-être humains, font l'objet d'importantes études dans le monde entier,

- les Gouvernements sont de plus en plus amenés à prendre des décisions réglementant ces activités, avec des répercussions économiques et politiques majeures,
- les choix politiques des Gouvernements sont influencés par les résultats d'études qui dépendent de manière critique de l'exactitude et de la cohérence de mesures pouvant nécessiter d'importants investissements économiques,
- de nombreuses preuves scientifiques importantes sur lesquelles s'appuient ces décisions sont issues de mesures de petites variations de certains paramètres clés, mesures qui s'étendent parfois sur plusieurs décennies,
- certaines mesures critiques ont été traditionnellement exprimées en utilisant des unités *ad hoc*, fondées sur des instruments et des méthodes spécifiques, et non pas les unités du Système international d'unités (SI), lesquelles sont bien définies et adoptées au niveau international,
- depuis de nombreuses années l'expérience montre que les mesures qui ne sont pas reliées directement au SI ne sont ni fiables à long terme, ni comparables aux mesures semblables faites ailleurs et ainsi ne permettent pas de mettre en évidence leurs éventuelles relations avec les mesures faites dans d'autres domaines scientifiques,
- les demandes accrues pour une fiabilité des mesures effectuées à des fins médicales et thérapeutiques exigent des réglementations plus rigoureuses dans ces domaines,

recommande que les responsables des études sur les ressources terrestres, l'environnement, le bien-être humain et les problèmes connexes fassent le nécessaire pour que les mesures effectuées dans le cadre de leurs programmes soient exprimées en unités bien définies du SI afin d'en assurer la fiabilité à long terme, la cohérence mondiale et le rattachement aux autres domaines scientifiques et techniques grâce au système de mesures mondial établi et conservé dans le cadre de la Convention du Mètre.

■ Révision de la mise en pratique de la définition du mètre

Résolution 5

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

rappelant que

- en 1983 la 17^e Conférence générale a adopté une nouvelle définition du mètre,
- à la même date la Conférence générale a invité le Comité international
 - à établir des instructions pour la réalisation pratique de la nouvelle définition du mètre (la mise en pratique),

- à choisir des radiations qui puissent être recommandées comme étalons de longueur d'onde pour la mesure interférentielle des longueurs et à établir des instructions pour leur emploi,
 - à poursuivre les études entreprises pour améliorer ces étalons et à compléter ou réviser par la suite ces instructions,
- en réponse à cette invitation le Comité international a adopté des recommandations en 1983 et aussi en 1992 concernant la mise en pratique du mètre,

considérant que

- la science et les techniques continuent à exiger une meilleure exactitude dans la réalisation du mètre,
- depuis 1992, les travaux effectués dans les laboratoires nationaux, au Bureau international des poids et mesures et dans d'autres laboratoires ont amélioré de manière significative la reproductibilité des radiations qui conviennent à la mise en pratique du mètre,
- de tels travaux ont réduit de manière significative l'incertitude sur la valeur de la fréquence et de la longueur d'onde dans le vide de certaines de ces radiations,
- une mise à jour de la liste des radiations recommandées est souhaitable en vue de diverses applications qui comprennent non seulement la réalisation directe du mètre, impliquant l'interférométrie optique pour la mesure pratique des longueurs, mais aussi la spectroscopie, la physique atomique et moléculaire et la détermination de constantes fondamentales,
- l'exactitude déjà obtenue et les avancées maintenant prévisibles dans certaines mesures spatio-temporelles exigent que la mise en pratique de la définition du mètre soit considérée du point de vue de la théorie de la relativité générale,

accueille favorablement l'adoption par le Comité international en 1997 de la mise en pratique révisée de la définition du mètre,

et **recommande** que les laboratoires nationaux poursuivent des recherches expérimentales et théoriques sur les étalons optiques de longueur d'onde et de fréquence, incluant de nouvelles techniques de comparaison des différents étalons sur une gamme étendue de longueur d'onde et de fréquence afin d'améliorer encore le fondement expérimental du Système international d'unités.

■ Besoins en métrologie dimensionnelle

Résolution 6

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant que

- les besoins de la métrologie dimensionnelle de haut niveau s'accroissent de façon continue,
- les tolérances dans les procédés de fabrication de haute technologie continuent à se resserrer et atteignent déjà dans certains domaines la limite des possibilités actuelles,
- le domaine de mesures pour lequel de telles exigences se manifestent s'étend inclusivement du domaine de la nanotechnologie jusqu'à celui de la géophysique,
- plusieurs autres domaines de la métrologie font appel aux unités dérivées du Système international d'unités qui elles-mêmes impliquent le mètre,
- les demandes les plus exigeantes en métrologie dimensionnelle font souvent appel à la réalisation du mètre par les moyens les plus simples et les plus directs possibles, à l'aide de lasers asservis,
- pour répondre aux besoins à venir et pour assurer que le système métrologique mondial sera en mesure de répondre à ces besoins, il est essentiel de poursuivre des recherches de base,

recommande que les laboratoires nationaux maintiennent un large éventail de recherches de base dans le domaine des longueurs, incluant la conservation et la mise en œuvre de techniques propres à répondre aux exigences croissantes et diversifiées dans le domaine de la métrologie dimensionnelle.

■ La définition du kilogramme

Résolution 7

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- le besoin d'assurer la stabilité à long terme du Système international d'unités (SI),
- l'incertitude intrinsèque relative à la stabilité à long terme du prototype qui sert à définir l'unité de masse, l'une des unités de base du SI,
- que cette incertitude se répercute sur la stabilité à long terme des trois autres unités de base du SI, nommément l'ampère, la mole et la candela, dont la définition dépend de celle du kilogramme,

- les progrès déjà obtenus dans différentes expériences destinées à relier l'unité de masse à des constantes fondamentales ou atomiques,
- qu'il est souhaitable de disposer de plusieurs méthodes pour réaliser ce lien,

recommande que les laboratoires nationaux poursuivent leurs efforts pour affiner les expériences qui relient l'unité de masse à des constantes fondamentales ou atomiques et qui pourraient, dans l'avenir, servir de base à une nouvelle définition du kilogramme.

■ Étalons primaires de fréquence opérationnels

Résolution 8

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant que

- il est important de maintenir en service un nombre convenable d'étalons primaires de fréquence pour assurer l'exactitude et la stabilité à long terme du Temps atomique international (TAI),
- de nouveaux étalons primaires sont mis au point en faisant appel à des techniques nouvelles,
- ces nouveaux étalons s'avèrent de façon significative plus exacts que les étalons primaires traditionnels sur lesquels se sont fondés le TAI et le Temps universel coordonné (UTC) dans le passé,
- en conséquence, l'exactitude du TAI et de l'UTC va rapidement dépendre de ces nouveaux étalons,
- d'importantes ressources sont nécessaires pour conserver en état de marche ces étalons primaires de fréquence destinés à assurer l'exactitude du TAI,

demande aux laboratoires nationaux de métrologie et aux autres laboratoires qui travaillent sur de nouveaux étalons primaires d'assurer les ressources en personnel et en fonctionnement nécessaires pour conserver en état de marche ces nouveaux étalons sur lesquels sera fondée l'exactitude du TAI et de l'UTC.

■ Extension de l'Échelle internationale de température au-dessous de 0,65 K

Résolution 9

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant que

- de multiples activités de recherche sont en cours à des températures inférieures à 0,65 K,
- ces recherches ont besoin d'une échelle de température reconnue qui représente avec une bonne approximation les températures thermodynamiques,
- les mesures directes de la température thermodynamique entre 0,65 K et quelques millikelvins sont souvent longues et difficiles, alors que, pour des températures beaucoup plus basses, les mesures directes sont de nouveau possibles,
- un travail considérable a déjà été accompli pour mettre au point une échelle de température entre 0,65 K et 1 mK utilisant la pression de fusion de ³He,

invite le Comité international à étudier une équation exprimant la variation de pression de fusion de ³He en fonction de la température thermodynamique qui puisse servir de base à une extension de l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90) au-dessous de sa limite inférieure actuelle de 0,65 K.

■ Métrologie en chimie

Résolution 10

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

rappelant la Résolution 7 de la 20^e Conférence générale des poids et mesures sur la métrologie en chimie,

considérant

- le développement mondial des accords commerciaux dans le cadre de l'Organisation mondiale du commerce,
- le besoin d'éliminer les obstacles techniques au commerce liés à la métrologie, en particulier dans les secteurs des sciences de la nutrition et de la pharmacologie,
- que de nombreuses décisions relatives à l'environnement et à la santé publique sont fondées sur des mesures en chimie,

- que les progrès de la traçabilité internationale ne sont pas encore suffisants dans le domaine des mesures en chimie,

recommande que les laboratoires nationaux de métrologie

- poursuivent leurs efforts en vue de commencer ou de coordonner, dans leur pays, les activités dans le domaine de la métrologie en chimie, en collaboration étroite avec les organismes concernés,
- définissent, en collaboration avec le Comité international, les domaines prioritaires et les comparaisons clés internationales essentielles pour établir la traçabilité des mesures en chimie, aussi bien au niveau mondial qu'au niveau régional.

■ Métrologie en biotechnologie

Résolution 11

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- l'importance croissante de la biotechnologie pour la santé humaine, les productions alimentaires, la médecine légale et la protection de l'environnement,
- le besoin de réaliser des mesures exactes traçables au Système international d'unités (SI) dans ces domaines d'activité,
- le manque d'infrastructure métrologique adéquate pour garantir une telle traçabilité,

recommande que les laboratoires nationaux

- envisagent de développer des programmes liés à la mesure de grandeurs importantes en biotechnologie,
- collaborent avec les unions scientifiques internationales et autres organisations internationales concernées pour établir, à l'échelle mondiale, une infrastructure adéquate pour garantir la traçabilité au SI des mesures en biotechnologie.

■ **Nom spécial donné à l'unité SI mole par seconde, le katal, pour exprimer l'activité catalytique**

Résolution 12

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- l'importance pour la santé humaine et la sécurité de faciliter l'emploi des unités du Système international d'unités (SI) dans les domaines de la médecine et de la biochimie,
- qu'une unité en dehors du SI appelée « unité » représentée par le symbole U, qui est égale à $1 \mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1}$, et qui n'est pas cohérente avec le SI, a été largement répandue en médecine et en biochimie depuis 1964 pour exprimer l'activité catalytique,
- que l'absence d'un nom spécial pour désigner l'unité dérivée et cohérente du SI qu'est la mole par seconde a conduit à ce que des résultats de mesures cliniques soient donnés en différentes unités locales,
- que l'emploi des unités SI en médecine et en chimie clinique est vivement recommandé par les unions internationales de ces domaines,
- que la Fédération internationale de chimie clinique et médecine de laboratoire a demandé au Comité consultatif des unités de recommander le nom spécial katal, symbole kat, pour l'unité SI mole par seconde,
- que tandis que la prolifération de noms spéciaux représente un danger pour le SI, il existe des exceptions pour certains sujets liés à la santé humaine et à la sécurité (15^e Conférence générale, 1975, Résolutions 8 et 9, 16^e Conférence générale, 1979, Résolution 5),

notant que le nom katal, symbole kat, est utilisé pour l'unité SI mole par seconde depuis plus de trente ans, pour exprimer l'activité catalytique,

décide d'adopter le nom spécial katal, symbole kat, pour l'unité SI mole par seconde pour exprimer l'activité catalytique, particulièrement dans les domaines de la médecine et de la biochimie,

et **recommande** que, lorsque le katal est utilisé, le mesurande soit spécifié en faisant référence au mode opératoire de mesure ; le mode opératoire de mesure doit mentionner le produit indicateur de la réaction mesurée.

■ Dotation du BIPM

Résolution 13

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- l'importance des travaux effectués par le Bureau international des poids et mesures (BIPM) et les services que celui-ci rend aux États membres de la Convention du Mètre,
- les efforts considérables réalisés par le BIPM pour améliorer sa productivité et son engagement à poursuivre cet effort,
- les conclusions du rapport *Besoins nationaux et internationaux dans le domaine de la métrologie : les collaborations internationales et le rôle du BIPM*,
- la décision du Comité international, fondée sur ce rapport, d'élargir les responsabilités du BIPM,
- la recommandation citée dans ce rapport qu'au vu de la situation économique difficile qui prévaut à l'heure actuelle dans de nombreux États membres de la Convention du Mètre, la dotation annuelle du BIPM demeure constante en valeur réelle pendant la période quadriennale 2001-2004, au niveau décidé par la 20^e Conférence générale pour l'an 2000,

notant que

- depuis le 1^{er} janvier 1999, une nouvelle monnaie, l'euro, est utilisée dans la plupart des États de l'Union européenne et que la valeur de leur monnaie en euro est définitivement fixée,
- le 1^{er} janvier 2002, la plupart des monnaies européennes, y compris le franc français, et par suite le franc-or, auront disparu,

décide que

- dorénavant, l'euro sera la monnaie utilisée pour le vote de la dotation annuelle du BIPM,
- la partie fixe de la dotation annuelle du BIPM sera augmentée de telle façon que l'ensemble de la partie fixe et de la partie complémentaire (définie à l'article 6, 1921) du Règlement annexé à la Convention du Mètre (1875) soit, pour les États parties à la Convention à l'époque de la 21^e Conférence de

8 697 000 euros en 2001 (31 440 039 francs-or)

8 828 000 euros en 2002 (31 913 610 francs-or)

8 960 000 euros en 2003 (32 390 796 francs-or)

9 094 000 euros en 2004 (32 875 212 francs-or).

Annexe A

Convocation de la 21^e Conférence générale des poids et mesures

Note : Le texte de la présente Convocation a été envoyé aux Gouvernements des États membres de la Convention du Mètre en décembre 1998. Un projet de résolution sur le katal a été ajouté en avril 1999. Durant la Conférence générale un grand nombre de projets de résolutions ont été modifiés ; les résolutions adoptées figurent aux pages 133 à 146. Dans le texte de la Convocation, il est fait référence à un accord de reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure ; par la suite la Conférence générale a décidé de remplacer le mot « accord » par celui d' « arrangement ».

Convocation de la 21^e Conférence générale des poids et mesures

La 21^e Conférence générale des poids et mesures est convoquée pour
le lundi 11 octobre 1999 à 10:00
au Centre de conférences internationales*, 19 avenue Kléber, Paris 16^e.

Constitution de la 21^e Conférence générale des poids et mesures

Convention du Mètre (1875) : article 3

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

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

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

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

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

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

* Le Centre de conférences internationales étant fermé pour travaux, le président de l'Académie des sciences de Paris a usé de ses bons offices pour permettre à la 21^e Conférence générale de se réunir exceptionnellement au Collège de France.

** Mentionné souvent dans ce document comme CIPM ou Comité international.

*** Mentionnée souvent dans ce document comme CGPM ou Conférence générale.

Lieu et dates des séances de la 21^e Conférence générale

Toutes les séances se tiendront au

Centre de conférences internationales*

19, avenue Kléber, Paris 16^e

dans une salle gracieusement offerte par le ministère des Affaires étrangères de France avec traduction simultanée en français et en anglais.

Première séance,	lundi	11 octobre 1999	à	10:00
Deuxième séance,	lundi	11 octobre 1999	à	15:00
Troisième séance,	mardi	12 octobre 1999	à	09:30
Quatrième séance,	mardi	12 octobre 1999	à	15:00
Cinquième séance,	vendredi	15 octobre 1999	à	09:30
Sixième séance,	vendredi	15 octobre 1999	à	15:00

Une visite du Bureau international, suivie d'une réception au Pavillon de Breteuil, aura lieu le mercredi 13 octobre à 15:00. Il est prévu que le Groupe de travail de la Conférence générale sur la dotation du BIPM se réunisse à 09:30 le mercredi 13 octobre et qu'une réunion des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie des États membres se tienne le jeudi 14 octobre toute la journée, à partir de 09:30. Les réunions du Groupe de travail sur la dotation et des directeurs des laboratoires nationaux se dérouleront au Centre de conférences internationales. La réunion des directeurs ne fait pas formellement partie de la Conférence générale et sera présidée par le président du Comité international.

Il est probable que la plupart des points principaux de l'ordre du jour jusqu'au point 11 compris seront traités au cours des quatre premières séances et que les séances cinq et six concerneront plutôt le programme de travail et le budget du BIPM, ainsi que le vote de toutes les résolutions.

* En fait au Collège de France, comme nous l'avons indiqué précédemment.

Ordre du jour provisoire de la 21^e Conférence générale

- 1 Ouverture de la Conférence.
- 2 Présentation des titres accréditant les délégués.
- 3 Nomination du secrétaire de la Conférence.
- 4 Établissement de la liste des délégués ayant pouvoir de voter.
- 5 Approbation de l'ordre du jour.
- 6 Rapport de M. le président du Comité international sur les travaux accomplis depuis la 20^e Conférence générale.
- 7 Rapport du Comité international sur les besoins nationaux et internationaux dans le domaine de la métrologie.
- 8 Traçabilité des étalons de mesure au niveau mondial.
- 9 Admission d'Associés à la Conférence générale des poids et mesures.
- 10 Relations avec l'Organisation internationale de métrologie légale.
- 11 Rapports des présidents des Comités consultatifs.
- 12 Programme des travaux futurs du BIPM.
- 13 Dotation annuelle du BIPM.
- 14 Propositions des délégués.
- 15 Renouvellement par moitié du Comité international.
- 16 Votes des résolutions.
- 17 Questions diverses.
- 18 Clôture de la Conférence.

Commentaires sur les principaux points de l'ordre du jour

Note à propos des projets de résolutions : l'emplacement dans la convocation des projets de résolutions ne reflète pas nécessairement le moment où les résolutions seront traitées ou mises au vote dans l'ordre du jour. Dans tous les cas, le vote des résolutions se déroule le dernier jour de la Conférence, après la fin des discussions.

1 Ouverture de la Conférence

La 21^e Conférence générale se tient quatre ans après la précédente. Cette périodicité de quatre ans entre les Conférences générales est maintenant bien établie, car elle est suffisante pour permettre aux États membres de faire le point des activités importantes menées sous l'égide de la Convention, tout en maintenant une fréquence de réunions suffisamment basse pour que les coûts administratifs et annexes ne soient pas excessifs.

2 Présentation des titres accréditant les délégués

Pour la bonne organisation de la Conférence, il est souhaitable que la composition de chaque délégation soit communiquée au BIPM au plus tard quinze jours avant l'ouverture de la Conférence.

À leur arrivée, les délégués accrédités à voter seront priés de présenter les titres remis par les autorités concernées de leur Gouvernement.

6 Rapport de M. le président du Comité international sur les travaux accomplis depuis la 20^e Conférence générale

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

Dans son rapport, le président soulignera les avancées importantes concernant les activités menées sous l'autorité de la Convention du Mètre depuis la 20^e Conférence générale. Beaucoup de ces activités ont été lancées au cours de la 20^e Conférence générale : le rapport sur les besoins à long terme relatifs à la métrologie (Résolution 11), l'accord proposé sur la reconnaissance mutuelle des étalons de mesure (faisant référence à la Résolution 2) et les discussions sur les relations avec l'Organisation

internationale de métrologie légale (Résolution 10). Chacun de ces points est mis à l'ordre du jour de la présente Conférence et presque tous les sujets importants, destinés à être discutés ou à faire l'objet d'une décision à la 21^e Conférence générale, sont liés ou s'appuient sur l'un ou l'autre de ces points. La période qui s'est écoulée depuis la 20^e Conférence générale a été d'une intense activité, sans précédent dans l'histoire de la Convention du Mètre.

Le rapport sur les besoins nationaux et internationaux dans le domaine de la métrologie a été transmis aux États membres en août 1998. C'est incontestablement la description la plus avancée des activités internationales de la métrologie jamais écrite et ce rapport est d'une importance capitale pour l'avenir de la Convention du Mètre. Il sera présenté et commenté par le secrétaire du CIPM au point 7 de l'ordre du jour. Plusieurs de ses conclusions ont déjà abouti à des décisions et à des actions prises par le CIPM ou le BIPM, et certaines autres sont présentées à la Conférence générale comme projets de résolutions.

L'une des conclusions de ce rapport est que le CIPM devrait avoir des contacts beaucoup plus étroits avec les laboratoires nationaux de métrologie et avec les organisations régionales de métrologie. Ceci l'a amené à organiser des réunions avec les directeurs des laboratoires nationaux de métrologie des États membres de la Convention du Mètre. Deux de ces réunions ont été organisées par le BIPM et se sont déroulées à Sèvres : la première en février 1997 et la deuxième en février 1998. La troisième se tiendra à Paris le jeudi 14 octobre 1999, pendant la semaine de la 21^e Conférence générale. Le succès de ces réunions a clairement démontré le besoin de se rencontrer en dehors du formalisme d'une Conférence générale pour débattre de sujets d'intérêt commun aux membres du CIPM, aux directeurs des laboratoires nationaux et aux responsables du BIPM. Ces réunions se poursuivront à l'avenir.

En outre, le CIPM a décidé de créer un Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM. Ce Comité mixte s'est réuni pour la première fois en février 1998.

Après avoir consulté les directeurs des laboratoires nationaux de métrologie, le CIPM a pris l'initiative de mettre en œuvre un accord de reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage émis par les laboratoires nationaux de métrologie. La Résolution 2 de la 20^e Conférence générale a posé les fondements formels de cet accord. Il a été paraphé par les directeurs des laboratoires nationaux de métrologie de trente-neuf États membres de la Convention du Mètre. Le CIPM invite la 21^e Conférence générale à reconnaître cet accord, objet du point 8 de l'ordre du jour.

Restreindre la participation à cet accord aux seuls États membres de la Convention du Mètre peut être interprété comme une barrière technique ou politique au commerce. Le CIPM a conscience que pour de nombreux pays,

la contribution annuelle au fonctionnement du BIPM est une charge financière, même s'ils en tirent d'importants bénéfices. Il propose donc à la Conférence, au point 9 de l'ordre du jour, la création d'une catégorie d'Associés à la Conférence. Un des objectifs de la création de cette catégorie d'Associés est d'assurer ainsi une liaison formelle avec les États qui ne souhaitent pas encore ou qui ne peuvent pas rejoindre la Convention du Mètre, afin de leur permettre de prendre part à l'accord de reconnaissance mutuelle et d'étendre ainsi la traçabilité au SI de leurs mesures.

Le rôle des Comités consultatifs du CIPM est étudié dans le rapport du CIPM sur les besoins nationaux et internationaux dans le domaine de la métrologie. La conclusion en est que l'étendue de la métrologie couverte par les Comités consultatifs devrait être accrue pour s'étendre à tous les domaines où la coordination internationale est nécessaire et où ce besoin n'est pas déjà du ressort d'une autre instance. Le CIPM a identifié trois nouveaux domaines dans lesquels un tel besoin existe : l'acoustique, les ultrasons et les vibrations constituent le premier, la dureté le deuxième, le débit de fluides, comprenant la viscosité, le troisième. Le besoin de coordination internationale des étalons de mesure pour le premier d'entre eux s'est révélé suffisamment urgent et important pour que le CIPM crée un nouveau Comité consultatif en ce domaine, le Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations (CCAUV). Pour la dureté, le débit de fluides, et la viscosité, le CIPM a créé des groupes de travail au sein d'un Comité consultatif existant, le Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées. Lors de l'étude sur les besoins à long terme dans le domaine de la métrologie, le CIPM s'est rendu compte que les appellations traditionnellement données à certains de ses Comités consultatifs existants reflétaient mal l'étendue de leur travail. Ceci tendait à renforcer un dangereux malentendu qui circulait dans certains milieux, selon lequel le travail du BIPM était étroit, purement scientifique et avait peu de rapports avec les besoins pratiques de la métrologie. Par exemple, le nom traditionnellement donné au Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM) ne reflétait pas les activités plus étendues de ce Comité en matière de mesures de longueur et de métrologie dimensionnelle. C'est pour cette raison que le CIPM, en septembre 1997, a modifié les appellations (et les sigles) de quatre de ses Comités consultatifs. Outre le CCDM, qui est devenu le Comité consultatif des longueurs (CCL), le Comité consultatif d'électricité (CCE) est devenu le Comité consultatif d'électricité et magnétisme (CCEM), le Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS) est devenu le Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF), et le Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants (CCEMRI) est devenu le Comité consultatif des rayonnements ionisants (CCRI). Les sigles en anglais correspondent au français.

En 1983, le CIPM a proposé à la Conférence générale un programme à long terme de construction de nouveaux bâtiments au BIPM. Ce programme comprenait un bâtiment de laboratoire pour la section des lasers, qui a été

terminé en 1984, un bâtiment pour une bibliothèque et des bureaux, terminé en 1988, et enfin un bâtiment pour l'atelier de mécanique. Cette dernière tranche du programme est maintenant mise en œuvre. Le bâtiment prévu abritera quelques bureaux et salles de réunion ainsi que l'atelier de mécanique ; l'achèvement des travaux est prévu pour l'an 2001 et il dotera enfin le BIPM d'un atelier moderne. L'atelier a, en effet, toujours été un sujet d'inquiétude pour le CIPM parce que les locaux réservés à cet usage étaient incommodes et non conformes aux normes actuelles de sécurité. L'espace rendu disponible par le déménagement de l'atelier vers le nouveau bâtiment permet aussi d'envisager l'installation d'un petit laboratoire de mesures en chimie.

Enfin, le président présentera le rapport sur le travail accompli par le BIPM depuis la 20^e Conférence générale.

7 Rapport du Comité international sur les besoins nationaux et internationaux dans le domaine de la métrologie

La Résolution 11 de la 20^e Conférence générale a formulé auprès du CIPM la demande suivante :

« d'étudier les besoins nationaux et internationaux à long terme relatifs à la métrologie, les nécessaires collaborations internationales et le rôle primordial du BIPM pour faire face à ces besoins, les engagements financiers ou autres qui seront demandés aux États membres au cours des décennies à venir, et d'en rendre compte. »

En réponse à cette résolution, le CIPM a demandé à l'un de ses membres, Monsieur W.R. Blevin, de préparer un projet de rapport. Après de nombreuses consultations, une première version de ce document a été présentée au CIPM en septembre 1996, et une version complémentaire en septembre 1997. Le texte définitif, adopté par le CIPM à la fin de l'année 1997, a été publié par le BIPM et envoyé aux États membres en août 1998. Le titre complet est le suivant *Besoins nationaux et internationaux dans le domaine de la métrologie : les collaborations internationales et le rôle du BIPM. Rapport préparé par le CIPM pour les Gouvernements des États membres de la Convention du Mètre*. Des copies de cet ouvrage sont disponibles auprès du BIPM. Ce document revêt une très grande importance, il a été largement distribué et peut être consulté sur le site Internet du BIPM (www.bipm.org). Ce rapport et les conclusions qu'il présente sont soumis aux États membres pour discussion. Le contenu peut être résumé comme suit.

La forte tendance vers la mondialisation du commerce international et de la production industrielle, la complexité toujours plus grande de la plupart des produits et des services, et l'intérêt croissant des peuples pour la santé, la sécurité et l'environnement figurent désormais parmi les principaux sujets de préoccupation des États. Ils entraînent la nécessité croissante d'un système de

mesure international uniforme et soulignent l'importance de l'accréditation et de la reconnaissance internationale des organismes de mesure et d'essais. Les accords commerciaux récents entre les nations et les régions impliquent que les signataires acceptent les résultats des mesures et des contrôles pratiqués par les autres parties. L'importance croissante, pour le commerce, de l'équivalence des services d'étalonnage et d'essais aura une influence profonde sur l'évolution à long terme des systèmes de mesure nationaux et internationaux. Il faudra tenir compte de ce contexte pour apprécier les besoins à venir en matière de métrologie et de collaboration internationale. Les aspects de la métrologie dans lesquels la collaboration internationale devra être poursuivie, et la plupart du temps renforcée, comprennent les accords liés à la définition et la réalisation des unités de mesure, la mise en place d'étalons nationaux de mesure et le compte rendu de leur équivalence sur le plan international, l'accréditation des laboratoires, la métrologie légale et les normes et autres documents de référence. Il est fondamental que la collaboration dans ces domaines soit multilatérale, à un niveau aussi bien international que régional.

Le rapport souligne que les programmes entrepris sous l'autorité de la Convention du Mètre ont eu une valeur considérable et parvient à la conclusion que la plupart de ceux qui sont en cours doivent être poursuivis. Cependant, selon un point de vue largement partagé, le BIPM et les Comités consultatifs du CIPM doivent maintenant aider davantage les laboratoires nationaux de métrologie des États membres à établir le degré d'équivalence de leurs étalons nationaux de mesure. Une méthode pour atteindre cet objectif a été instaurée par le CIPM et le BIPM qui ont introduit la réalisation, dans le cadre du BIPM, de comparaisons clés des étalons de mesure, le couplage de ces comparaisons avec des comparaisons similaires organisées par les organisations régionales de métrologie et le développement de l'accord de reconnaissance mutuelle (*voir* projet de résolution A).

Le rôle des Comités consultatifs doit être sensiblement renforcé et un programme de travail plus ambitieux doit être mené entre les réunions. Les critères d'appartenance aux Comités ont été revus et clarifiés, et la présence d'observateurs aux réunions sera acceptée afin de permettre à un plus grand nombre d'États membres de participer. Les missions de chaque Comité doivent être précisées ; un membre du personnel scientifique du BIPM est affecté à chaque Comité en qualité de secrétaire exécutif. Les domaines de la métrologie couverts par certains des Comités seront élargis et un ou plusieurs Comités supplémentaires pourraient être créés. Ainsi seront traités les principaux domaines de la métrologie pour lesquels une collaboration entre les laboratoires nationaux est importante afin de rendre compte de l'équivalence internationale des étalons. Le CIPM a mené des études dont certaines ont déjà abouti pour une éventuelle extension aux domaines de l'acoustique, des ultrasons, des vibrations, de la dureté, du débit de fluides et de la viscosité, mais il y a beaucoup d'autres domaines dans lesquels, tôt ou

tard, il sera nécessaire d'établir l'équivalence internationale des étalons et des mesures : le BIPM est le mieux placé pour déceler ces besoins en émergence et initier la coopération internationale appropriée.

La métrologie fondamentale ou appliquée concerne maintenant de nombreux organismes mondiaux ou régionaux. Au niveau mondial, le BIPM a entrepris de collaborer plus étroitement avec les organismes suivants : International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC), Organisation internationale de métrologie légale (OIML), Organisation internationale de normalisation (ISO) et Commission électrotechnique internationale (CEI). Au niveau régional, il travaillera avec les organisations régionales de métrologie. Dans ce but, le CIPM a pris l'initiative de créer le Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM, sous la présidence du directeur du BIPM.

Conformément à des décisions récentes, des actions stratégiques vont être menées par le BIPM pour accroître son assistance aux pays en voie de développement. Il s'agit de renforcer leurs systèmes nationaux de mesure, et plus particulièrement d'ériger la mesure au niveau de composante importante du développement économique. Certaines de ces actions entraînent une étroite collaboration avec l'Organisation internationale de métrologie légale, les organisations régionales de métrologie et l'International Measurement Confederation (IMEKO).

Le CIPM a défini le rôle du BIPM au cours des premières décennies du 21^e siècle. Le présent document comporte vingt et une décisions précises à propos des activités futures du BIPM et des Comités consultatifs. Le BIPM se devra de mettre en place de nouveaux programmes en temps voulu, soit pour répondre aux nouvelles demandes des États membres, soit pour tirer profit des progrès de la science et de la technologie. L'impact de ces nouveaux programmes sur le budget du BIPM dépend largement de l'équilibre entre le besoin d'embaucher du personnel et les économies qui pourront être réalisées en mettant fin à certains secteurs d'activité, en les diminuant ou encore en optimisant leur efficacité. Le programme à long terme de construction de bâtiments, entrepris par le BIPM au début des années 1980, approche de son terme et il n'est pas prévu de bâtiments supplémentaires au cours des prochaines décennies.

Le rapport se termine par l'examen des engagements financiers requis auprès des États membres de la Convention du Mètre, comprenant les besoins futurs de soutien financier au BIPM au vu des développements prévisibles de ses activités et tenant compte des contraintes économiques maintenant imposées à la plupart des États membres. Cette partie du rapport est traitée au point 12 du projet d'ordre du jour. Le CIPM propose le projet de résolution A suivant à propos de ce rapport :

■ Métrologie : besoins à long terme

Projet de résolution A

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- la Résolution 11 de la 20^e Conférence générale, qui a demandé au Comité international d'étudier les besoins à long terme relatifs à la métrologie et d'en rendre compte,
- l'étude qui a été achevée en 1997 à la suite de larges consultations internationales,
- le rapport qui en a résulté, intitulé *Besoins nationaux et internationaux dans le domaine de la métrologie : les collaborations internationales et le rôle du BIPM*, remis par le Comité international en 1998 aux Gouvernements des États membres,

accueille favorablement les nombreuses décisions du Comité international consécutives à cette étude, et en particulier

- l'élargissement progressif des missions des Comités consultatifs afin qu'ils couvrent les principaux domaines de la métrologie où la collaboration entre les laboratoires nationaux de métrologie est importante, non seulement en physique et en ingénierie mais également dans d'autres disciplines telles que la chimie et la biotechnologie,
- le renforcement du rôle des Comités consultatifs et l'admission d'observateurs aux réunions afin de permettre à un plus grand nombre d'États membres de participer,
- l'accent mis sur l'évaluation et la publication du degré d'équivalence des étalons nationaux de mesure des États membres et la mise en place d'un accord de reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage délivrés par les laboratoires nationaux de métrologie,
- la mise en place de réunions régulières avec les directeurs des laboratoires nationaux de métrologie des États membres,
- les déclarations faites par le Comité international au sujet du rôle du BIPM au cours des premières décennies du vingt et unième siècle,
- la collaboration plus étroite du BIPM avec les organismes internationaux concernés, plus particulièrement les organisations régionales de métrologie, l'International Laboratory Accreditation Cooperation et l'Organisation internationale de métrologie légale,
- les progrès considérables déjà accomplis par le Comité international dans la mise en œuvre de ses décisions,

prend note de la discussion dans le rapport du Comité international des engagements financiers à long terme demandés aux États membres,

remercie les nombreux organismes et les personnes qui ont apporté leur contribution à cette étude et au rapport du Comité international.

8 Traçabilité des étalons de mesure au niveau mondial

La Résolution 2 de la 20^e Conférence générale a posé les bases d'une importante initiative qui a abouti à un projet d'accord de reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure conservés par les laboratoires nationaux de métrologie et des certificats d'étalonnage qu'ils émettent. Le besoin de traçabilité des étalons au niveau mondial est maintenant universellement accepté. Le problème rencontré par les laboratoires nationaux était d'y parvenir, tout en évitant d'avoir à gérer un nombre trop important d'accords bilatéraux d'équivalence entre les étalons de mesure. Il était évident que les laboratoires nationaux de métrologie pouvaient envisager de tels accords multilatéraux au sein de leurs groupes régionaux. C'est alors qu'on a pensé à un système d'accord international mis en place par le biais d'accords bilatéraux entre groupes régionaux.

Lors de la première réunion des directeurs de laboratoires, en février 1997, le directeur du BIPM proposa une approche qui donnerait lieu à un accord international plutôt qu'à un réseau d'accords régionaux. Après de nombreuses discussions et des échanges de correspondance, un large consensus s'est dégagé en faveur de la réalisation d'un tel accord au niveau mondial. Après de longues consultations avec les directeurs des laboratoires nationaux de métrologie et une discussion lors de la réunion du CIPM de septembre 1997, un projet d'accord a été présenté aux directeurs pendant leur deuxième réunion, au mois de février 1998. Après l'avoir quelque peu modifié, le texte provisoire a été paraphé par les directeurs ou représentants mandatés des laboratoires nationaux de métrologie de trente-neuf États membres, dans le but de signer un accord définitif lors d'une prochaine réunion des directeurs fixée pendant la période de la 21^e Conférence générale. Le texte provisoire paraphé par les directeurs a été envoyé aux représentants diplomatiques des États membres à Paris au mois de mai 1998, afin d'informer officiellement les États membres de cette proposition.

Le projet d'accord fait référence au Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM. Le CIPM a créé ce Comité en septembre 1997 ; il s'est réuni pour la première fois en février 1998 sous la présidence du directeur du BIPM.

Le président du CIPM présentera à la Conférence l'état de la situation actuelle de l'accord et proposera à la Conférence générale d'adopter le projet de résolution B suivant :

■ Reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage délivrés par les laboratoires nationaux de métrologie

Projet de résolution B

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- la Résolution 2 de la 20^e Conférence générale concernant la traçabilité des mesures au niveau mondial,
- le besoin rapidement croissant de démontrer l'équivalence au niveau international des mesures et des résultats des essais liés au commerce,
- le nombre croissant d'accords de reconnaissance mutuelle entre les services d'étalonnage et d'essais négociés entre divers États,
- que les services d'étalonnage et d'essais de chaque État dépendent d'un laboratoire national tant pour les étalons de mesure que pour leur traçabilité au SI,

reconnait que la reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure et des services d'étalonnage des laboratoires nationaux de métrologie est nécessaire pour fournir le fondement de la reconnaissance mutuelle généralisée aux services nationaux d'étalonnage et d'essais,

accueille favorablement

- l'initiative prise par le Comité international de rédiger un accord de reconnaissance mutuelle relatif aux étalons nationaux de mesure et aux certificats d'étalonnage établis par les laboratoires nationaux de métrologie,
- la décision des États membres qui ont déjà donné autorité pour signer cet accord au directeur du laboratoire national de métrologie de leur pays qu'ils ont désigné,

invite

- tous les autres États membres de la Convention du Mètre à participer à cet accord en conférant l'autorité nécessaire au directeur du laboratoire national de métrologie de leur pays qu'ils auront désigné pour signer cet accord,
- tous les États membres à déployer tous leurs efforts pour mettre en œuvre l'accord et à faire en sorte que toutes les autorités de leur pays reconnaissent l'équivalence ainsi démontrée des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage.

9 Admission d'Associés à la Conférence générale

Il est apparu, à l'occasion de la mise au point de l'accord de reconnaissance mutuelle traité au point 8 de l'ordre du jour, qu'il faut trouver un moyen de raccorder au SI les activités métrologiques d'un nombre d'États beaucoup

plus grand que celui des États actuellement membres de la Convention du Mètre. Nous ne pouvons ignorer que le commerce international exige la traçabilité des mesures au SI pour tous les échanges commerciaux entre les nations. Nous devons cependant accepter qu'il existe de nombreux États plus petits ou moins influents qui trouveraient difficile d'acquitter la redevance annuelle, même minimale, d'un État membre de la Convention du Mètre (0,5 % de la dotation du BIPM). Le CIPM estime que la Conférence générale devrait assumer la responsabilité de trouver un mécanisme pour établir des liens au SI de tous les systèmes de mesure de tous les États et entités économiques, y compris ceux qui ne sont pas membres de la Convention du Mètre. La participation à l'accord de reconnaissance mutuelle par le biais d'organisations régionales de métrologie semble être un moyen d'y parvenir. Il est cependant nécessaire d'établir un lien formel au BIPM, et d'apporter une contribution financière pour couvrir les frais. La Convention du Mètre ne prévoit pas une catégorie « Associés » mais, par analogie avec la Convention de l'OIML, le CIPM propose à la 21^e Conférence générale de créer une catégorie d'Associés à la Conférence générale. Les États ou entités économiques associés auraient le droit de participer à l'accord de reconnaissance mutuelle selon des modalités à préciser. Cette proposition, qui a le soutien du Gouvernement français dépositaire de la Convention du Mètre, est traitée dans le projet de résolution C suivant :

■ Associés à la Conférence générale des poids et mesures

Projet de résolution C

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant que

- le système de mesure mondial, fondé sur le Système international d'unités (SI) utilisé dans presque tous les domaines de la société moderne, repose sur l'application universelle des décisions de la Conférence générale des poids et mesures,
- tous les États, et pas uniquement ceux qui sont membres de la Convention du Mètre, s'engagent dans des mesures liées au commerce et qui doivent être traçables au SI,
- les États qui ne sont pas membres de la Convention du Mètre sont à l'heure actuelle exclus des activités de cette Convention,
- les États membres de la Convention du Mètre soutiennent le système de mesure mondial en consacrant des ressources financières considérables au BIPM et à leur propre système national de mesure,
- de nombreux États plus petits peuvent avoir des difficultés à dégager des sommes suffisantes pour assumer le coût de leur appartenance à la Convention du Mètre,

et **considérant** en outre le besoin de maintenir des relations étroites avec les unions scientifiques internationales et les autres organisations internationales dont le travail est lié à la métrologie,

décide

- d'assumer la responsabilité de fournir aux États et entités économiques qui ne sont pas encore membres de la Convention du Mètre les moyens d'établir la liaison au système de mesure mondial de manière à assurer la reconnaissance de la traçabilité de leurs mesures au SI,
- qu'une liaison importante peut être assurée par la participation à l'accord de reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure mis en place par le Comité international,
- que la participation à cet accord pour un tel État ou entité économique devrait être réalisée par l'association de ses laboratoires nationaux de métrologie à une Organisation régionale de métrologie membre du Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM,

et **décide** en conséquence

- d'inviter ces États et entités économiques à assister à la Conférence générale à titre d'Associés, établissant ainsi la liaison avec les États membres de la Convention du Mètre, liaison qui leur est nécessaire pour participer à l'accord de reconnaissance mutuelle,
- d'inviter les unions scientifiques internationales et les autres organisations internationales qui poursuivent des activités liées à celles de la Convention du Mètre, à assister également à la Conférence générale en tant qu'organisations associées,
- que les États associés, entités économiques et organisations associées à la Conférence générale participent à la Conférence générale en nommant des observateurs n'ayant pas le droit de vote,
- que les États associés et entités économiques associées acquitteront une souscription annuelle au BIPM pour couvrir les coûts des services que le Comité international des poids et mesures pourra leur fournir ; la souscription annuelle de chaque État associé ou entité économique associée sera déterminée à partir de sa contribution aux Nations unies, comme pour les États membres, mais avec un minimum égal à 0,05 % de la dotation annuelle du BIPM,
- qu'un État ou entité économique souhaitant devenir associé(e) peut le devenir sur demande adressée au directeur du BIPM directement, ou par l'intermédiaire de son ambassade à Paris, en s'acquittant de la première annuité de sa souscription,
- qu'un État associé ou une entité économique associée n'ayant pas réglé sa souscription pendant trois années cesse d'être associé ; il peut le redevenir en acquittant ces arriérés.

10 Relations avec l'Organisation internationale de métrologie légale

La Résolution 10 de la 20^e Conférence générale a invité le président du CIPM et le président du CIML à créer un groupe de travail commun pour définir les moyens d'accroître leur coopération et leur efficacité dans la réalisation de leurs objectifs et l'emploi de leurs ressources, y compris, mais non exclusivement, pour étudier la possibilité de fusionner les deux organisations. La même résolution a également invité le CIPM, après avoir reçu le rapport de son président, à faire connaître aux États membres de la Convention du Mètre les résultats des discussions et son opinion au sujet de l'opportunité de poursuivre des actions dans ce sens.

Comme il avait été demandé par la 20^e Conférence générale, le président du CIPM et le président du CIML ont créé un groupe de travail qui s'est réuni trois fois, en février 1996, en février 1997 et en février 1998 ; une autre réunion est prévue en février 1999. À partir de 1998, des représentants de l'ILAC ont participé aux réunions du groupe de travail.

Il est apparu très tôt aux représentants du CIPM, au cours de la discussion au sein du groupe de travail, qu'une fusion des deux organisations ne déboucherait pas sur des avantages significatifs en termes d'efficacité de fonctionnement ou de meilleure appréhension de leurs tâches respectives, qui ne seraient déjà obtenus par la coopération entre les deux organisations. Certains moyens ont donc été trouvés pour une collaboration plus étroite et une approche commune de certaines actions, et ils ont déjà été mis en œuvre. Le CIPM a été informé de cette conclusion en 1996.

Une des actions importantes menée par le BIPM, l'IMEKO et l'OIML, et organisée par la Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB (Braunschweig), fut une réunion ayant pour objet les besoins métrologiques des pays en voie de développement et des pays émergents, qui s'est tenue à la PTB au mois de juin 1998.

Une autre action conjointe du BIPM et du BIML concerne la responsabilité du *Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie* et du *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*. La responsabilité de ces deux documents, par suite d'un accord commun entre les sept organisations internationales concernées, c'est-à-dire l'ISO, le BIPM, la CEI, l'IFCC, l'OIML, l'UICPA et l'UIPPA, a été transférée de l'ancien ISO TAG-4 à un nouveau Comité commun pour les guides en métrologie (JCGM). Le nouveau JCGM composé des sept mêmes organisations internationales, plus l'ILAC, est indépendant de l'ISO et n'est de la sorte pas soumis à certaines contraintes qui pourraient gêner l'évolution des deux documents. Le secrétariat du JCGM est assuré conjointement par le BIPM et le BIML, et le premier président du JCGM est le directeur du BIPM.

Le président du CIPM rendra compte de l'issue des dernières discussions au sein du Groupe de travail Convention du Mètre/OIML.

En réponse à la Résolution 10 de la 20^e Conférence générale, le Comité international avise les États membres de la Convention du Mètre qu'il a engagé des actions en vue d'améliorer la collaboration avec l'OIML, mais qu'il n'y a pas lieu de mener à l'heure actuelle d'action complémentaire quant à la proposition de fusion des deux organisations.

11 Rapports des présidents des Comités consultatifs

Les rapports seront présentés par les présidents des dix Comités consultatifs du CIPM sur le travail accompli depuis la 20^e Conférence générale. Des versions écrites de ces rapports seront disponibles pour les délégués présents à la Conférence. Les rapports publiés des réunions des Comités consultatifs cités par les présidents sont disponibles sur le site d'accueil du BIPM sur Internet (www.bipm.org).

Le projet de résolution D suivant, qui concerne tous les domaines de la métrologie, rappelle la Résolution 1 de la 20^e Conférence générale et une fois encore attire l'attention des Gouvernements des États membres sur le besoin de réaliser les mesures critiques en unités du SI :

■ Nécessité d'utiliser les unités du SI dans les recherches sur les ressources terrestres, l'environnement, la sécurité humaine et les études connexes

Projet de résolution D

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant que

- les effets sur la géosphère et la biosphère des activités industrielles et commerciales et de nombreuses autres activités humaines ainsi que des phénomènes naturels, et leurs conséquences sur la santé et le bien-être humains, font l'objet d'importantes études dans le monde entier,
- les Gouvernements sont de plus en plus amenés à prendre des décisions réglementant ces activités, avec des répercussions économiques et politiques majeures,
- les choix politiques des Gouvernements sont influencés par les résultats d'études qui dépendent de manière critique de l'exactitude et de la cohérence de mesures pouvant nécessiter d'importants investissements économiques,
- de nombreuses preuves scientifiques importantes sur lesquelles s'appuient ces décisions sont issues de mesures de petites variations à long terme de certains paramètres clés, mesures qui s'étendent parfois sur plusieurs décennies,

- certaines mesures critiques ont été traditionnellement exprimées en utilisant des unités *ad hoc*, fondées sur des instruments et des méthodes spécifiques, et non pas les unités du SI, lesquelles sont bien définies et adoptées au niveau international,
- depuis de nombreuses années l'expérience montre que les mesures qui ne sont pas reliées directement au SI ne sont ni fiables à long terme, ni comparables aux mesures semblables faites ailleurs et ainsi ne permettent pas de mettre en évidence leurs éventuelles relations avec les mesures faites dans d'autres domaines scientifiques,
- les demandes accrues pour une fiabilité des mesures effectuées à des fins médicales et thérapeutiques exigent des réglementations plus rigoureuses dans ces domaines,

recommande que les responsables des études sur les ressources terrestres, l'environnement, le bien-être humain et les problèmes connexes fassent le nécessaire pour que les mesures effectuées dans le cadre de leurs programmes soient exprimées en unités bien définies du SI afin d'en assurer la fiabilité à long terme, la cohérence mondiale et le rattachement aux autres domaines scientifiques et techniques grâce au système de mesures mondial établi et conservé dans le cadre de la Convention du Mètre.

11.1 Le Comité consultatif des longueurs

La 9^e session du Comité consultatif pour la définition du mètre (dont le nouveau nom est Comité consultatif des longueurs, CCL) s'est tenue en septembre 1997. Trois sujets importants ont été traités lors de la réunion : le premier concernait la révision de la mise en pratique de 1992 de la définition du mètre ; le deuxième l'élargissement de la portée du Comité à la métrologie dimensionnelle ; le troisième la sélection de comparaisons clés dans le domaine des longueurs afin de démontrer l'équivalence des étalons nationaux de mesure.

La révision de la mise en pratique adoptée par le CCL, puis approuvée par le CIPM, réduit les incertitudes données pour les longueurs d'onde et les fréquences de quelques-unes des radiations recommandées, inclut cinq nouvelles radiations recommandées et supprime deux radiations qui ne sont plus utilisées. Une note a été ajoutée concernant l'interprétation de la mise en pratique de la définition du mètre dans le contexte de la relativité générale. Le projet de résolution E se réfère à la nouvelle mise en pratique :

■ Révision de la mise en pratique de la définition du mètre

Projet de résolution E

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

rappelant que

- en 1983 la 17^e Conférence générale a adopté une nouvelle définition du mètre,
- à la même date la Conférence générale a invité le Comité international
 - à établir des instructions pour la réalisation pratique de la nouvelle définition du mètre (la mise en pratique),
 - à choisir des radiations qui puissent être recommandées comme étalons de longueur d'onde pour la mesure interférentielle des longueurs et à établir des instructions pour leur emploi,
 - à poursuivre les études entreprises pour améliorer ces étalons et à compléter ou réviser par la suite ces instructions,
- en réponse à cette invitation le Comité international a adopté des Recommandations en 1983 et aussi en 1992 concernant la mise en pratique du mètre,

considérant que

- la science et les techniques continuent à exiger une meilleure exactitude dans la réalisation du mètre,
- depuis 1992, les travaux effectués dans les laboratoires nationaux, au Bureau international des poids et mesures et dans d'autres laboratoires ont amélioré de manière significative la reproductibilité des radiations qui conviennent à la mise en pratique du mètre,
- de tels travaux ont réduit de manière significative l'incertitude sur la valeur de la fréquence et de la longueur d'onde dans le vide de certaines de ces radiations,
- une mise à jour de la liste des radiations recommandées est souhaitable en vue de diverses applications qui comprennent non seulement la réalisation directe du mètre, impliquant l'interférométrie optique pour la mesure pratique des longueurs, mais aussi la spectroscopie, la physique atomique et moléculaire et la détermination de constantes fondamentales,
- l'exactitude déjà obtenue et les avancées maintenant prévisibles dans certaines mesures spatio-temporelles exigent que la mise en pratique de la définition du mètre soit considérée du point de vue de la théorie de la relativité générale,

accueille favorablement l'adoption par le Comité international en 1997 de la mise en pratique révisée de la définition du mètre,

et **recommande** que les laboratoires nationaux poursuivent des recherches expérimentales et théoriques sur les étalons optiques de longueur d'onde et de fréquence, incluant de nouvelles techniques de comparaison des différents

étalons sur une gamme étendue de longueur d'onde et de fréquence afin d'améliorer encore le fondement expérimental du Système international d'unités.

L'extension du domaine d'activités du CCL à la métrologie dimensionnelle répond au besoin de choisir et d'exécuter des comparaisons clés dans ce domaine. Le CCL, pour ces comparaisons clés, a choisi un certain nombre d'étalons utilisés en métrologie dimensionnelle pour évaluer les principales techniques de chaque domaine. Les comparaisons clés commencées par celles des calibres se poursuivront par celles de polygones optiques comme étalons d'angle, puis celles d'étalons de diamètres et de formes, des calibres à étages et des plateaux à boules pour contrôler les machines tridimensionnelles. Au vu de l'importance de la métrologie des longueurs pour la science et l'industrie de haute technologie, le CIPM propose à la Conférence générale le projet de résolution suivant :

■ Besoins en métrologie dimensionnelle

Projet de résolution F

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant que

- les besoins de la métrologie dimensionnelle de haut niveau s'accroissent de façon continue,
- les tolérances dans les procédés de fabrication de haute technologie continuent à se resserrer et atteignent déjà dans certains domaines la limite des possibilités actuelles,
- l'étendue du domaine de mesures pour lequel de telles exigences se manifestent va du domaine de la nanotechnologie jusqu'à celui de la géophysique,
- plusieurs autres domaines de la métrologie font appel aux unités dérivées du SI qui elles-mêmes impliquent le mètre,
- les demandes les plus exigeantes font souvent appel à la réalisation du mètre par des moyens les plus simples et les plus directs possibles, à l'aide de lasers asservis,
- pour répondre aux besoins à venir et pour assurer que le système métrologique mondial sera en mesure de répondre à ces besoins, il est essentiel de poursuivre des recherches de base,

recommande que les laboratoires nationaux maintiennent un large éventail de recherches de base dans le domaine des longueurs, incluant la conservation et la mise en œuvre de techniques propres à répondre aux exigences croissantes et diversifiées dans le domaine de la métrologie dimensionnelle.

11.2 Le Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées

Le Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM) s'est réuni en mai 1996. Le CCM continue de travailler au sein de groupes de travail spécialisés au nombre de sept, y compris un groupe de travail dédié à la constante d'Avogadro. La plus grande partie du travail du CCM, lors de cette réunion et depuis, a été consacrée aux comparaisons clés. Le Comité a choisi un nombre de comparaisons clés pour couvrir les domaines de la métrologie des masses et de la pression ; la première série de la plupart de ces comparaisons devrait être terminée à temps pour la prochaine session du CCM prévue en mai 1999. Les domaines de métrologie couverts par le CCM revêtent une grande importance scientifique et industrielle et tous les laboratoires nationaux des États membres de la Convention travaillent dans ces domaines. Des conférences internationales ont lieu régulièrement, consacrées à la métrologie de la pression et de la force, toutes organisées par les laboratoires nationaux de métrologie en coopération avec les groupes de travail correspondants du CCM ou de l'IMEKO. Le Groupe de travail sur la constante d'Avogadro a été créé à la demande des laboratoires nationaux de métrologie pour coordonner l'effort entrepris à l'échelle mondiale en vue de déterminer la valeur de cette constante avec une grande exactitude comme une voie susceptible de fournir une nouvelle définition du kilogramme fondée sur une masse atomique. Le projet n'est pas encore prêt d'aboutir mais d'importants progrès ont été faits et des problèmes intéressants relatifs à la structure et la composition d'un monocristal de silicium ont été mis à jour.

■ La définition du kilogramme

Projet de résolution G

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- le besoin d'assurer la stabilité à long terme du SI,
- l'incertitude intrinsèque relative à la stabilité à long terme du prototype qui sert à définir l'unité de masse, l'une des unités de base du SI,
- que cette incertitude se répercute sur la stabilité à long terme des trois autres unités de base du SI, nommément l'ampère, la mole et la candela dont la définition dépend de celle du kilogramme,
- les progrès déjà obtenus dans différentes expériences destinées à relier l'unité de masse à des constantes fondamentales ou atomiques,
- qu'il est souhaitable de disposer de plusieurs méthodes pour réaliser ce lien,

recommande que les laboratoires nationaux poursuivent leurs efforts pour affiner les expériences qui relient l'unité de masse à des constantes fondamentales ou atomiques et qui pourraient, dans l'avenir, servir de base à une nouvelle définition du kilogramme.

11.3 Le Comité consultatif du temps et des fréquences

Le Comité consultatif pour la définition de la seconde (maintenant Comité consultatif du temps et des fréquences, CCTF) s'est réuni en mai 1996. À la différence de la plupart des autres Comités consultatifs, qui se sont consacrés au choix et à l'exécution de nouvelles comparaisons clés, le CCTF démontre depuis de nombreuses années le degré d'équivalence des étalons nationaux de mesure par le biais de sa responsabilité du Temps atomique international (TAI). Le temps et la fréquence sont peut-être les deux grandeurs pour lesquelles le besoin d'équivalence mondiale au plus haut niveau d'exactitude est le plus évident. Ce sont aussi les grandeurs pour lesquelles les comparaisons internationales peuvent être réalisées avec l'exactitude la plus élevée. La partie la plus conséquente du travail du CCTF continue d'être celle des études pour l'amélioration du calcul du TAI et de sa diffusion sous la forme du Temps universel coordonné (UTC), ainsi que des études théoriques liées à ces tâches. Les améliorations des horloges primaires et des moyens de comparaison du temps et des fréquences par satellite ont augmenté la stabilité et réduit les incertitudes dans le TAI et l'UTC de près d'un facteur dix depuis la dernière Conférence générale. Les demandes de résultats précis pour de nombreuses applications liées à la navigation et aux communications sont si proches des limites actuelles du possible qu'on comprend l'insistance des utilisateurs pour améliorer l'exactitude des mesures dans ce domaine. Il est donc important que de nouvelles mises au point d'étalons primaires de fréquence aboutissent le plus tôt possible afin qu'ils contribuent de manière opérationnelle au TAI et à l'UTC. Le projet de résolution suivant traite ce point :

■ Étalons primaires de fréquence opérationnels

Projet de résolution H

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- qu'il est important de maintenir en service un nombre convenable d'étalons primaires de fréquence pour assurer l'exactitude et la stabilité à long terme du TAI,
- que de nouveaux étalons primaires sont mis au point en faisant appel à des techniques nouvelles,
- que ces nouveaux étalons s'avèrent de façon significative plus exacts que les étalons primaires traditionnels sur lesquels se sont fondés le TAI et l'UTC dans le passé,
- qu'en conséquence, l'exactitude du TAI et de l'UTC va rapidement dépendre de ces nouveaux étalons,

- que d'importantes ressources sont nécessaires pour conserver en état de marche ces étalons de fréquence destinés à assurer l'exactitude du TAI,

demande aux laboratoires, nationaux ou non, qui travaillent sur de nouveaux étalons primaires, d'assurer les ressources en personnel et en fonctionnement nécessaires pour conserver en état de marche ces nouveaux étalons sur lesquels est fondée l'exactitude du TAI et de l'UTC.

L'exactitude des comparaisons des échelles de temps nationales, par observation de satellites s'améliore continuellement, et certains paramètres deviennent de plus en plus critiques. Il y a donc un besoin de coordonner autant que possible les diverses études sur ces paramètres ; ceci a été traité par le CCTF.

11.4 Le Comité consultatif d'électricité et magnétisme

Le Comité consultatif d'électricité (maintenant Comité consultatif d'électricité et magnétisme, CCEM) s'est réuni en juin 1997. La métrologie électrique a un large impact non seulement dans les affaires industrielles et commerciales mais également en physique fondamentale où les effets quantiques macroscopiques, c'est-à-dire les effets Josephson et l'effet Hall quantique, ont rendu possibles beaucoup de nouvelles mesures directement liées aux constantes fondamentales et atomiques. Le CCEM continue de regarder avec intérêt de telles expériences et une part importante des discussions lors des réunions du CCEM concerne les sujets liés aux constantes fondamentales et au SI. Le Groupe de travail du CCEM sur les méthodes électriques permettant de contrôler la stabilité du kilogramme a été constitué afin de conseiller le CCEM, et donc le CIPM, dans ce domaine important. Jusqu'à maintenant les expériences en question n'ont pas atteint un niveau de reproductibilité suffisant pour contrôler effectivement la stabilité du prototype international du kilogramme, mais on pense qu'en temps utile, elles y parviendront. Le CCEM suit également les expériences directes pour la réalisation des unités électriques du SI et il a reçu les rapports sur les progrès atteints dans la mise au point de dispositifs à effet tunnel mono-électronique ainsi qu'un récent travail entrepris pour une meilleure compréhension de l'effet Hall quantique. Les membres du CCEM consacrent maintenant beaucoup de leurs efforts à la réalisation des comparaisons clés dans le domaine de l'électricité. Un groupe de travail sur les comparaisons clés a tout d'abord identifié une série de comparaisons et il a maintenant la responsabilité de s'assurer qu'elles sont exécutées et évaluées selon les modalités définies dans le document intitulé « Directives pour les comparaisons clés du CIPM » rédigé par le BIPM. Le même groupe de travail est chargé d'examiner les comparaisons déjà effectuées pour déceler celles qui peuvent être utilisées provisoirement pour démontrer l'équivalence des étalons nationaux de mesure. Le CCEM a aussi reçu un rapport sur les

activités menées par son Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences.

11.5 Le Comité consultatif de thermométrie

Le Comité consultatif de thermométrie (CCT) s'est réuni en septembre 1996. L'activité principale du CCT continue d'être liée à l'Échelle internationale de température (EIT-90) et aux déterminations de température thermodynamique en utilisant des méthodes primaires. Cette réunion a été la première depuis l'adoption du texte de l'EIT-90 en 1989. Elle a été endeuillée par le décès de son très aimé et très respecté président, Luigi Crovini, survenu en octobre 1995, peu de temps après la 20^e Conférence générale.

Le CCT a examiné de près l'expérience acquise par les laboratoires nationaux depuis 1990 dans la mise en pratique de l'EIT-90, expérience qui a totalement justifié l'énorme travail qui a abouti à la mise au point de la nouvelle échelle dans les années 1980. D'autres études doivent cependant être menées, coordonnées par les cinq groupes de travail du CCT : organisation de comparaisons clés en thermométrie, évaluation des comparaisons passées, études des points fixes de définition et des instruments d'interpolation, déterminations de température thermodynamique et extension de l'EIT-90 à des températures inférieures à sa limite actuelle la plus basse qui est de 0,65 K, travail sur la détermination de la température thermodynamique pour les corps noirs au-dessus de 2500 K. Le dernier de ces sujets est un projet commun avec le Comité consultatif de photométrie et de radiométrie. Le CIPM propose le projet de résolution suivant à propos de l'extension de l'EIT-90 à des températures plus basses :

■ Extension de l'Échelle internationale de température au-dessous de 0,65 K

Projet de résolution I

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant que

- de multiples activités de recherche sont en cours à des températures inférieures à 0,65 K,
- ces recherches ont besoin d'une échelle de température reconnue qui représente avec une bonne approximation les températures thermodynamiques,
- les mesures directes de la température thermodynamique entre 0,65 K et quelques millikelvins sont souvent longues et difficiles, alors que pour des températures beaucoup plus basses, les mesures directes sont de nouveau possibles,

- un travail considérable a déjà été accompli pour développer une échelle de température entre 0,65 K et 1 mK utilisant la pression de fusion de ^3He ,

invite le Comité international à étudier une équation exprimant la variation de pression de fusion de ^3He en fonction de la température thermodynamique qui puisse servir de base à une extension de l'EIT-90 au-dessous de sa limite inférieure actuelle de 0,65 K.

Le CCT s'est aussi adjoint un groupe de travail sur les mesures d'humidité, groupe créé à l'origine par le CCM. La création de ce groupe de travail est la conséquence de l'importance pour l'industrie de mesures exactes d'humidité relative et d'hygrométrie souvent aux niveaux extrêmes, hauts ou bas.

11.6 Le Comité consultatif de photométrie et radiométrie

Le Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR) s'est réuni en juin 1997. Les points principaux de l'ordre du jour traitaient du choix et du démarrage des comparaisons clés en radiométrie et photométrie. Des discussions approfondies ont eu lieu sur les procédures à utiliser pour mettre en place de telles comparaisons et sur la manière d'évaluer et de présenter les résultats. Bien que la plus grande part de l'effort des laboratoires nationaux ait porté ces dernières années sur l'amélioration de la radiométrie spectrale, fondée sur l'utilisation répandue de radiomètres cryogéniques, l'importance des besoins de l'industrie en matière d'étalons photométriques exacts s'est reflétée dans le choix des comparaisons clés. Ces comparaisons sont à la fois radiométriques et photométriques. On a apporté un soin particulier à la métrologie dans l'ultraviolet. Le CCPR conserve son lien avec la Commission internationale de l'éclairage (CIE), qui gère, entre autres, la coordination internationale en matière de couleur. Depuis 1985, les membres du CCPR sont en première ligne dans l'organisation d'une série de conférences regroupées sous le titre général NEWRAD, conférences qui réunissent des représentants de la métrologie, des ressources terrestres, de la physique solaire et des communautés de l'espace. Le succès remporté par ces conférences a conduit à former un comité permanent de NEWRAD qui, bien qu'il ne soit pas lié formellement au CCPR, continuera de faire en sorte que les mesures en radiométrie liées aux ressources terrestres et à la physique solaire, dont l'importance ne cesse de croître, s'appuient sur des bases métrologiques solides. Il n'en a pas toujours été ainsi dans le passé. La Résolution 1 de la 20^e Conférence générale avait traité ce sujet, mais il s'est avéré difficile de persuader les responsables de ces mesures de les rendre traçables au SI pour en garantir la fiabilité. Pour cette raison, le CIPM a une fois de plus attiré l'attention sur ce problème dans le projet de résolution D.

11.7 Le Comité consultatif des rayonnements ionisants

Le Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants (maintenant Comité consultatif des rayonnements ionisants, CCRI) s'est réuni en juin 1996 et en juillet 1997. Des étalons de mesure exacts et la traçabilité au SI dans les mesures des rayonnements ionisants sont essentiels pour sauvegarder la santé humaine. La dose correcte de rayonnements ionisants utilisée en radiothérapie pour le traitement du cancer ne peut être garantie que par des mesures exactes rattachées au SI. La protection adéquate contre les rayonnements ionisants utilisés à usage industriel ou scientifique nécessite aussi des mesures traçables au SI. Il incombe au CCRI d'assurer cette traçabilité des mesures et donc leur fiabilité. Le CCRI est subdivisé en trois groupes répartis en : Section I (dosimétrie des rayonnements pour les rayons x et γ et les électrons), Section II (mesure des radionucléides) et Section III (mesures neutroniques). Les principales tâches des trois Sections sont d'organiser et d'effectuer des comparaisons internationales d'étalons de mesure, certaines déjà identifiées en tant que comparaisons clés du BIPM, et de s'assurer que les étalons primaires des différentes grandeurs définies dans ce domaine sont correctement entretenus.

11.8 Le Comité consultatif pour la quantité de matière

Le Comité consultatif pour la quantité de matière (CCQM) s'est réuni aux mois de février 1996, 1997 et 1998. En tant que nouveau Comité consultatif, qui s'est tenu pour la première fois en 1995, le CCQM a tenté d'établir sa visibilité aussi rapidement que possible au sein de la communauté internationale de la chimie analytique. Il y est parvenu avec grand succès, mais non sans effort. Il apparaît maintenant clairement que la décision du CIPM de créer le CCQM a été prise exactement au bon moment. Le développement rapide des réglementations liées au commerce international a démontré que la comparabilité des mesures analytiques se situe à un niveau très inférieur à ce qu'il devrait être. Le concept de traçabilité au SI est presque inconnu dans le monde de la chimie analytique où subsiste une réticence très ancrée pour changer des habitudes prises de longue date. Même si le CCQM n'est pas seul à œuvrer pour l'introduction d'une métrologie valable en chimie analytique et n'est pas le groupe le plus étroitement associé au monde des chimistes, il a maintenant établi son propre rôle. Parmi les organismes de ce domaine d'activités, le CCQM est maintenant reconnu comme l'entité qui met en place les méthodes primaires de mesure et coordonne le travail métrologique entre les laboratoires nationaux chargés des mesures, dans le domaine de la chimie. Le CCQM lors de sa dernière réunion a choisi les deux premières comparaisons clés et en prévoit au moins huit autres dans un proche avenir. Le CCQM comprend des membres ou observateurs de l'Eurachem, l'organisme européen de métrologie en chimie, de CITAC, un groupement mondial de chimie analytique, et de l'ISO-REMCO aussi bien que de l'UICPA. Il est reconnu par tous que

l'établissement d'un fondement métrologique solide en chimie analytique, fondement comparable à celui qui existe pour la plupart des mesures physiques, prendra des années. Le CIPM propose les projets de résolution J et K suivants sur cet important sujet :

■ Métrologie en chimie

Projet de résolution J

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

rappelant la Résolution 7 de la 20^e Conférence générale des poids et mesures sur la métrologie en chimie,

considérant

- le développement mondial des accords commerciaux dans le cadre de l'Organisation mondiale du commerce,
- le besoin d'éliminer les obstacles techniques au commerce liés à la métrologie, en particulier dans les secteurs des sciences de la nutrition et de la pharmacologie,
- que de nombreuses décisions relatives à l'environnement et à la santé publique sont fondées sur des mesures en chimie,
- que les progrès de la traçabilité internationale ne sont pas encore suffisants dans le domaine des mesures en chimie,

recommande que les laboratoires nationaux de métrologie

- poursuivent leurs efforts en vue de commencer ou de coordonner, dans leur pays, les activités dans le domaine de la métrologie en chimie, en collaboration étroite avec les organismes concernés,
- définissent, en collaboration avec le Comité international, les domaines prioritaires et les comparaisons clés internationales essentielles pour établir la traçabilité des mesures en chimie, aussi bien au niveau mondial qu'au niveau régional.

■ Métrologie en biotechnologie

Projet de résolution K

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- l'importance croissante de la biotechnologie pour la santé humaine, les productions alimentaires, la médecine légale et la protection de l'environnement,
- le besoin de réaliser des mesures exactes traçables au SI dans ces domaines d'activité,

- le manque d'infrastructure métrologique adéquate pour garantir une telle traçabilité,

recommande que les laboratoires nationaux de métrologie

- envisagent de développer des programmes liés à la mesure de grandeurs importantes en biotechnologie,
- collaborent avec les unions scientifiques internationales et autres organisations internationales concernées pour établir, à l'échelle mondiale, une infrastructure adéquate pour garantir la traçabilité au SI des mesures en biotechnologie.

11.9 Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations

En réponse à des demandes émanant de nombreux laboratoires nationaux de métrologie, le Comité international a réuni en mars 1998 des spécialistes pour rendre compte du besoin d'une action internationale concertée en métrologie de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations. À la suite de cette réunion, qui comprenait des experts délégués par les organismes de normes internationales ISO et CEI ainsi que des représentants des laboratoires nationaux, les recommandations suivantes furent préconisées : *a)* de mener une action sous l'égide du Comité international pour organiser des comparaisons internationales d'étalons de mesure dans ces domaines d'activités et *b)* de créer un Comité consultatif.

Le CIPM, lors de sa réunion de septembre 1998 a pris en compte ces recommandations et a décidé de créer un Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations. La première session du nouveau Comité consultatif se tiendra en 1999 et son président fera son rapport à la Conférence générale.

11.10 Le Comité consultatif des unités

Le Comité consultatif des unités (CCU) s'est réuni en avril 1996 et en septembre 1998. Une des importantes tâches du CCU est de proposer au CIPM le texte de la brochure sur le SI au cours de ses éditions successives. Lors de la réunion de 1996, le CCU a examiné le projet de la 7^e édition, comprenant la décision de la 20^e Conférence générale d'abolir la classe d'unités SI supplémentaires. Le CCU a décidé de revoir le texte complètement et a fait de très nombreuses petites modifications dans le but de clarifier le sens et de rendre la brochure plus accessible. La 7^e édition de la brochure sur le SI a été publiée en juin 1998.

Le CCU, lors de sa 13^e session qui s'est tenue en septembre 1998, a proposé au CIPM que le neper soit formellement utilisé comme nom spécial pour l'unité dérivée sans dimension « un » pour exprimer les valeurs des grandeurs logarithmiques. Le CIPM a appuyé cette proposition et présente le projet de résolution L suivant :

■ Le neper et le bel

Projet de résolution L

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant que

- le logarithme naturel est utilisé pour définir le décrement logarithmique, le niveau de champ et le niveau de puissance dans le système de grandeurs sur lequel est basé le SI,
- les grandeurs et les équations entre grandeurs sur lesquelles le SI est basé sont simplifiées quand on utilise le logarithme naturel,
- en particulier pour les grandeurs complexes le seul logarithme utile est le logarithme naturel,
- avec l'emploi du logarithme naturel, le radian et le neper deviennent couplés et devraient donc avoir des statuts comparables dans le SI,
- la 20^e Conférence générale (1995, Résolution 8) a décidé de considérer les unités alors supplémentaires dans le SI, c'est-à-dire le radian et le stéradian, comme étant des unités dérivées sans dimension et en conséquence de supprimer la classe des unités supplémentaires en tant que classe séparée dans le SI,
- le Comité international, dans la brochure sur le SI, 7^e édition (1998), a accepté le nom neper et son symbole Np, comme nom spécial pour l'unité « un », unité cohérente du SI, dans l'expression des valeurs des grandeurs logarithmiques lorsqu'on utilise les logarithmes naturels, et également le nom bel, et le symbole B, pour exprimer les valeurs de telles grandeurs lorsqu'on utilise les logarithmes de base dix, et qu'il a souligné qu'il est essentiel de préciser le niveau de référence,
- il est nécessaire de compléter le SI de façon cohérente en adoptant formellement un nom spécial et un symbole pour l'unité « un » unité cohérente du SI, pour exprimer les valeurs des grandeurs logarithmiques dans des domaines comme l'acoustique et l'électrotechnique,

confirme la décision du Comité international d'accepter pour l'usage avec le Système international d'unités le nom bel, et le symbole B, et celui de son sous-multiple d'usage courant le décibel, symbole dB, lorsqu'on utilise les logarithmes de base dix,

décide d'adopter le nom spécial neper, symbole Np, pour l'unité « un » sans dimension, unité dérivée du SI, pour l'expression des valeurs des grandeurs logarithmiques telles que le décrement logarithmique, le niveau de champ ou le niveau de puissance, lorsqu'on utilise les logarithmes naturels.

Note : Le Comité international a proposé en avril 1999 à la 21^e Conférence générale un projet de résolution supplémentaire, le projet de résolution N, qui concerne un nouveau nom spécial, le katal, pour désigner l'unité dérivée et

cohérente du SI mole par seconde, utilisée pour exprimer l'activité catalytique.

En faisant cette proposition à la Conférence générale, le CIPM a agi sur le conseil de son Comité consultatif des unités (CCU) et de son Comité consultatif pour la quantité de matière (CCQM). Ces deux comités ont examiné le sujet et recommandé cette proposition.

Lors de sa réunion de 1998, le CCU a examiné une proposition de l'International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (Fédération internationale de chimie clinique et médecine de laboratoire, IFCC) qui demandait que, pour des raisons liées à la santé humaine et à la sécurité, et pour faciliter l'emploi des unités du SI en chimie clinique, le nom katal soit formellement adopté par la Conférence générale comme nom spécial donné à l'unité dérivée du SI mole par seconde, pour exprimer l'activité catalytique. Le CCU a accepté les arguments de l'IFCC et a formulé la recommandation appropriée au CIPM qui a, à son tour, examiné la proposition lors de sa réunion de septembre 1998. Le CIPM, tout en acceptant les arguments du CCU, a décidé de consulter le CCQM avant de prendre une décision. Le CCQM, lors de sa réunion de février 1999, a recommandé d'accepter la proposition du CCU. Le CIPM fait donc maintenant la proposition suivante à la 21^e Conférence générale.

■ **Nom spécial donné à l'unité dérivée du SI mole par seconde, le katal, pour exprimer l'activité catalytique**

Projet de résolution N

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- l'importance pour la santé humaine et la sécurité humaine de faciliter l'emploi des unités du SI dans les domaines de la médecine et de la biochimie,
- qu'une unité en dehors du SI appelée « unité », représentée par le symbole U, qui est égale à $1 \mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1}$, et qui n'est pas cohérente avec le SI, a été largement répandue en médecine et en biochimie depuis 1964 pour exprimer l'activité catalytique,
- que l'absence d'un nom spécial pour désigner l'unité dérivée et cohérente du SI qu'est la mole par seconde a conduit à ce que des résultats de mesures cliniques soient donnés en différentes unités locales,
- que l'emploi des unités SI en médecine et en chimie clinique est vivement recommandé par les unions internationales de ces domaines,
- que la Fédération internationale de chimie clinique et médecine de laboratoire a demandé au Comité consultatif des unités de recommander le nom spécial katal, symbole kat, pour l'unité SI mole par seconde,

- que tandis que la prolifération de noms spéciaux représente un danger pour le SI, il existe des exceptions pour certains sujets liés à la santé humaine et à la sécurité (15^e Conférence générale, 1975, Résolutions 8 et 9, 16^e Conférence générale, 1979, Résolution 5),

notant que le nom katal, symbole kat, a été utilisé pour l'unité SI mole par seconde depuis plus de trente ans, pour exprimer l'activité catalytique,

décide d'adopter le nom spécial katal, symbole kat, pour l'unité SI mole par seconde utilisée dans les domaines de la médecine et de la biochimie afin d'exprimer l'activité catalytique,

et recommande que lorsque le katal est utilisé, le mesurande soit spécifié en faisant référence au mode opératoire de mesure ; le mode opératoire de mesure doit mentionner le produit indicateur de la réaction mesurée.

12 Programme des travaux futurs du BIPM

Un programme détaillé des travaux futurs du BIPM pour les années 2001 à 2004 est proposé par le Comité international dans un document intitulé *Programme de travail et budget du Bureau international des poids et mesures pour les quatre années 2001 à 2004* (voir Annexe B, pages 183-207).

13 Dotation annuelle du BIPM

La 20^e Conférence générale a décidé d'accroître la dotation annuelle du BIPM de 4,5 % par an durant la période de 1997 à 2000. L'augmentation des prix en France au cours des années 1997 et 1998 a été inférieure aux 2,5 % prévus au moment de la 20^e Conférence générale ; ceci a aidé le BIPM à mettre en œuvre certaines des recommandations décrites dans le rapport sur les besoins à long terme relatifs à la métrologie. De plus, les contributions annuelles reçues des États membres ont été en moyenne, ces dernières années, proches du montant de la dotation voté par les Conférences générales successives. Par exemple, au cours de la période 1990 à 1997, les contributions payées se sont élevées à 99,4 % de la dotation totale votée par la Conférence générale, malgré des fluctuations annuelles parfois conséquentes, ayant une fois dépassé 30 %. Des efforts faits au BIPM pour améliorer l'efficacité en réduisant les dépenses lorsque c'était possible et pour maintenir le même programme mais avec un personnel réduit, ont également porté leurs fruits. La situation financière du BIPM en 1998 est saine et en bonne position pour affronter l'avenir. Par une bonne gestion du budget, il a été possible de lancer la construction de la troisième et dernière phase des projets à long terme de construction qui avaient été évoqués pour la première fois lors de la Conférence générale de 1983 et que le rapport du président du CIPM mentionne. Il a également été possible de prévoir l'installation d'un

petit laboratoire pour la métrologie en chimie dans des locaux rendus disponibles par le déplacement de l'atelier dans un nouveau bâtiment. Le niveau des réserves financières prévu pour l'an 2000 est toujours de quelque 65 % du budget annuel et l'augmentation des ressources nécessaires pour la caisse de retraite est assuré par le budget annuel. Tout cela est très positif et le CIPM est satisfait de rendre compte aux Gouvernements des États membres que les ressources considérables données au BIPM ont été bien utilisées.

Toutefois, le Comité international se trouve confronté à un dilemme quant aux dotations futures du BIPM à proposer à la 21^e Conférence générale. Il est clair que les demandes pour les services fournis par le BIPM augmenteront : il y aura un nombre croissant de comparaisons internationales ; le rôle de secrétaire exécutif des Comités consultatifs du BIPM augmentera la charge de travail des personnes concernées, le Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM demandera des prestations : enfin, la métrologie en chimie est un domaine à forte croissance dans lequel le BIPM doit s'impliquer, sans mentionner l'augmentation croissante de l'activité internationale en métrologie, poussée par la globalisation du commerce international. Les retombées générales sur le BIPM de la mise en place de l'accord de reconnaissance mutuelle ne sont pas encore évaluées, mais elles seront très certainement significatives. Tout cela implique davantage de travail de laboratoire et de soutien administratif, ainsi que davantage de congrès internationaux et de visites pour mieux appréhender et se familiariser avec le travail, les besoins et les moyens des laboratoires nationaux de métrologie. Il est également clair que la majorité des Gouvernements membres impose de telles contraintes économiques sur les dépenses que pour la prochaine période de quatre années, il semble inopportun de demander une augmentation en valeur réelle de leur contribution du BIPM.

Le CIPM, dans son rapport sur les besoins nationaux et internationaux dans le domaine de la métrologie, a examiné la situation financière du BIPM et a fait des projections de dépenses au-delà des prochaines périodes quadriennales, c'est-à-dire les périodes 2001 à 2004, et 2005 à 2008 pour lesquelles les dotations seront décidées par les 21^e et 22^e Conférences générales respectivement en 1999 et 2003. Après avoir considéré les scénarios de plusieurs hypothèses au sujet du niveau approprié de dotation annuelle au cours de la décennie 2001 à 2010, le CIPM a décidé de recommander à la 21^e Conférence générale de garder la dotation constante en valeur réelle pendant la période 2001 à 2004, au niveau déjà déterminé par la 20^e Conférence générale pour l'an 2000. Il est parvenu à cette décision en ayant à l'esprit qu'avec un soin constant apporté dans sa gestion budgétaire, en continuant de réaliser des économies et d'améliorer son efficacité, cette dotation serait suffisante pour permettre au BIPM de réaliser l'augmentation prévue de sa charge de travail pendant la période quadriennale concernée.

En considérant le financement futur du BIPM, le CIPM a également pris en compte les autres frais des États membres liés à leur appartenance à la Convention du Mètre et aux organisations régionales de métrologie. Ces frais s'ajoutent au paiement annuel de la dotation du BIPM. Certaines décisions du CIPM, parmi lesquelles l'introduction de comparaisons clés, l'accord de reconnaissance mutuelle et l'élargissement des domaines de la métrologie couverts par les Comités consultatifs, risquent d'augmenter quelque peu leurs frais. Pour de telles tâches cependant, qui sont de portée mondiale et pour lesquelles il y a consensus, il n'y a pas d'autres moyens plus efficaces financièrement que de s'associer à l'effort de collaboration mondiale. Chaque État membre est encouragé à contrôler ces coûts supplémentaires en identifiant les activités techniques les plus conformes à l'intérêt national et en y participant prioritairement. Il faut cependant garder présent à l'esprit que la métrologie évolue et s'accroît à la fois par le nombre et par la complexité de ses applications. Il se peut que ceci conduise à étendre progressivement ou à modifier les programmes nationaux, l'unique alternative à des dépenses supplémentaires serait alors une redéfinition brutale des priorités traditionnelles.

Le CIPM lors de sa session de septembre 1998 a confirmé la conclusion à laquelle il était arrivé dans son rapport sur les besoins nationaux et internationaux dans le domaine de la métrologie, et a décidé que la dotation demandée aux Gouvernements des États membres, lors de la 21^e Conférence générale, pour la période quadriennale 2001 à 2004, devrait demeurer constante en valeur réelle et au niveau de la dotation votée par la 20^e Conférence générale pour l'an 2000.

Une analyse soignée des prévisions d'inflation en France a amené le CIPM à la conclusion que pour conserver un niveau de dotation constant en valeur réelle au cours des années 2001 à 2004, l'augmentation annuelle de la dotation doit être de 2 % en termes monétaires, à partir du niveau fixé par la 20^e Conférence générale pour l'an 2000. Ceci est traité dans le projet de résolution M ci-dessous :

■ Dotation du BIPM

Projet de résolution M

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- l'importance des travaux effectués par le Bureau international des poids et mesures (BIPM) et les services que celui-ci rend aux États membres de la Convention du Mètre,
- les efforts considérables réalisés par le BIPM pour améliorer sa productivité et son engagement pour poursuivre cet effort,

- les conclusions du rapport *Besoins nationaux et internationaux dans le domaine de la métrologie : les collaborations internationales et le rôle du BIPM*,
- la décision du Comité international, fondée sur ce rapport, d'élargir les responsabilités du BIPM,
- la recommandation citée dans le rapport qu'au vu de la situation économique difficile qui prévaut à l'heure actuelle dans de nombreux États membres de la Convention du Mètre, la dotation annuelle du BIPM demeure constante en valeur réelle pendant la période quadriennale 2001 à 2004, au niveau décidé par la 20^e Conférence générale pour l'an 2000,

notant que

- le 1^{er} janvier 1999, une nouvelle monnaie, l'euro, sera utilisée dans la plupart des États de l'Union européenne et que la valeur de ces monnaies en euro sera définitivement fixée,
- le 1^{er} janvier 2002 la plupart des monnaies européennes incluant le franc français et par suite le franc-or auront disparu,

décide que

- la partie fixe de la dotation annuelle du Bureau international des poids et mesures sera augmentée de telle façon que l'ensemble de la partie fixe et de la partie complémentaire (définie à l'article 6, 1921) du Règlement annexé à la Convention du Mètre (1875) soit, pour les États parties à la Convention à l'époque de la 21^e Conférence portée à l'équivalent en euros de

31 596 000 francs-or en 2001

32 228 000 francs-or en 2002

32 873 000 francs-or en 2003

33 530 000 francs-or en 2004

- dorénavant, l'euro sera la monnaie utilisée pour le vote de la dotation du BIPM.

14 Propositions des délégués

Il est demandé aux délégués des États membres de faire connaître au Comité international les vœux ou propositions qu'ils désirent soumettre à la Conférence générale aussi rapidement que possible, et en tout cas au moins six mois avant la Conférence, conformément à la décision de la 9^e Conférence générale (1948) : « les vœux ou propositions ainsi déposés seront transmis par le bureau du Comité à tous les États adhérents à la Convention, au moins quatre mois avant l'ouverture de la Conférence, afin que les délégués puissent recevoir les instructions et pouvoirs nécessaires. Tout autre vœu ou proposition ne sera présenté à la Conférence qu'à la condition que le Comité ait eu le temps nécessaire de l'étudier et l'aura approuvé. »

15 Renouvellement par moitié du Comité international

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

décembre 1998
révisé avril 1999

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

Le Secrétaire,
W.R. Blevin

Le Président,
J. Kovalevsky

Annexe B

**Programme de travail et budget du
Bureau international des poids et mesures
pour les quatre années 2001 à 2004**

Note : Dans le texte de la Convocation et dans le Programme de travail et budget du BIPM pour les quatre années 2001 à 2004, il est fait référence à un accord de reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure ; par la suite la Conférence générale a décidé de remplacer le mot « accord » par celui d' « arrangement ».

Introduction

Ce document détaille les points 12 et 13 de l'Ordre du jour provisoire de la 21^e Conférence générale des poids et mesures (*voir* Convocation de la Conférence générale, Annexe A, pages 147-182). Le point 12 de l'Ordre du jour traite du programme des travaux futurs du Bureau international des poids et mesures (BIPM) et le point 13 de la dotation annuelle, comprenant le revenu total et les budgets annuels prévus pour chacune des quatre années 2001 à 2004.

Dans son rapport intitulé « Besoins nationaux et internationaux dans le domaine de la métrologie », qui a été envoyé aux Gouvernements des États membres au mois d'août 1998, le Comité international des poids et mesures (CIPM) a défini le rôle du BIPM pour les premières décennies du 21^e siècle. Ce rapport, joint aux Comptes rendus de la 21^e Conférence générale, mentionne vingt et une décisions qui concernent directement le rôle du BIPM. Le programme de travail ci-dessous doit être examiné à la lumière de ces décisions.

Le programme de travail du Bureau international des poids et mesures, point 12 de l'Ordre du jour provisoire de la 21^e Conférence générale, est traité ici sous les titres suivants :

- 1 Longueurs
- 2 Masse
- 3 Temps
- 4 Électricité
- 5 Radiométrie et photométrie
- 6 Rayonnements ionisants
- 7 Métrologie en chimie
- 8 Services généraux et scientifiques des laboratoires
- 9 Services administratifs généraux
- 10 Bâtiments et parc
- 11 Personnel
- 12 Contribution à la Caisse de retraite

1 Longueurs

1.1 Comparaisons internationales

La principale activité de la section des longueurs demeurera les comparaisons internationales de fréquences de lasers recommandées par le CIPM comme fréquences de référence pour la mise en pratique de la définition du mètre. La longue série de comparaisons à la longueur d'onde de 633 nm effectuées à l'aide de lasers à hélium-néon asservis sur des raies d'absorption de l'iode, projet en cours depuis 1972, a été sélectionnée par le Comité consultatif des longueurs (CCL) (alors le Comité consultatif pour la définition du mètre, CCDM), lors de sa réunion de 1997, comme l'une des comparaisons clés en métrologie des longueurs. Ces comparaisons seront donc poursuivies, 633 nm demeurant la longueur d'onde la plus couramment utilisée par les laboratoires nationaux pour leur réalisation de la définition du mètre. De plus en plus, les comparaisons sont faites en transportant les étalons du BIPM dans un laboratoire national de métrologie choisi pour permettre à d'autres laboratoires nationaux de la même région d'y apporter leurs étalons au même moment, dans le but d'effectuer une comparaison multilatérale. Des comparaisons internationales sont aussi réalisées à d'autres longueurs d'onde, par exemple à la longueur d'onde $\lambda \approx 3,39 \mu\text{m}$ liée à de nouvelles déterminations de la constante de Rydberg, ou lors de l'utilisation de chaînes de fréquence fonctionnant depuis la fréquence d'une horloge à césium jusqu'au domaine des fréquences visibles. Dans tous les cas, le BIPM demeurera le laboratoire de référence garantissant des étalons stables qui peuvent être utilisés pour lier des mesures effectuées dans différents laboratoires à différents moments.

1.2 Radiations recommandées dans la mise en pratique de la définition du mètre

Le travail continuera afin d'améliorer la stabilité et la reproductibilité des étalons de fréquence à laser transportables, dans le cadre du programme de comparaisons internationales mentionné ci-dessus. Nous ne pouvons pas travailler sur toutes les radiations recommandées par le CIPM en 1997 pour la réalisation du mètre. Cependant, en examinant soigneusement les besoins des laboratoires nationaux et en prenant en compte les avancées de la physique, il est possible d'effectuer un choix raisonnable de la radiation la plus intéressante sur laquelle concentrer nos efforts. À présent, et probablement pour les quatre prochaines années, il est vraisemblable que la radiation à la longueur d'onde $\lambda \approx 532 \text{ nm}$, produite par un laser Nd:YAG à fréquence doublée, constituera un sujet d'activités important. De même, des progrès considérables sont réalisés dans la mise au point de systèmes à diode laser, asservis sur l'iode à $\lambda \approx 633 \text{ nm}$ ou sur le rubidium à $\lambda \approx 778 \text{ nm}$, comme étalons de fréquence. La fabrication de cuves pour des lasers asservis sur

l'iode, fabriqués à l'extérieur, fait partie de ce travail et sera poursuivie. De plus, si le temps nous en est donné, nous poursuivrons l'étude des facteurs qui limitent la reproductibilité de telles cuves, en particulier l'identification et les effets des impuretés gazeuses.

1.3 Gravimétrie

Des mesures exactes de l'accélération due à la pesanteur, g , continuent à être demandées par la communauté géodésique. L'entretien du réseau gravimétrique international, dont la référence est le point A situé au BIPM, exige des comparaisons internationales régulières de gravimètres absolus. Ces comparaisons sont organisées par le BIPM en liaison avec l'Union géodésique et géophysique internationale et l'Association internationale de géodésie. Il est prévu que la prochaine comparaison de ce type ait lieu au BIPM en 2001. Les stations gravimétriques du BIPM vont être améliorées avant cette comparaison. La mesure de g au BIPM est maintenant réalisée avec un gravimètre absolu du commerce et bien que le BIPM effectue peu de recherches sur la mise au point de tels instruments, son fonctionnement et sa maintenance nécessitent de modestes efforts qui seront poursuivis.

1.4 Métrologie dimensionnelle : nanométrie

Nos activités dans le domaine de la métrologie dimensionnelle sont limitées : elles concernent la nanométrie et consistent à mettre au point des méthodes optiques de mesure de règles périodiques. Ces travaux se poursuivront dans les années à venir.

2 Masse

2.1 Fabrication et étalonnage d'étalons de masse

Le BIPM continuera à fournir aux laboratoires nationaux de métrologie des États membres de la Convention du Mètre des prototypes de 1 kg en platine iridié fabriqués avec une tolérance de 1 mg par rapport au Prototype international du kilogramme. Ces nouveaux prototypes sont habituellement étalonnés avec une incertitude de 4 μ g et participent ensuite aux étalonnages réguliers organisés par le BIPM. Le nouveau tour à outil au diamant offert au BIPM en 1998 par une fondation japonaise sans but lucratif (Japan Society for the Promotion of Machine Industry), que l'on est en train de mettre en service au BIPM, sera utilisé pour la fabrication et l'ajustage des nouveaux étalons.

Bien que la principale tâche du BIPM en matière d'étalonnages d'étalons de masse concerne les prototypes de 1 kg en platine iridié, des étalonnages de

prototypes de 1 kg en acier inoxydable sont aussi pratiqués. Ils sont effectués pour des laboratoires nationaux de métrologie dont les étalons nationaux sont en acier inoxydable, et pour les laboratoires qui se réfèrent à des prototypes en acier inoxydable comme étalons secondaires. Nous devons maintenir au plus haut niveau de performance les balances et autres équipements nécessaires non seulement à ces étalonnages mais aussi aux étalonnages et aux mesures de masse volumique de prototypes en platine iridié, et être capables d'y adapter les technologies les plus récentes dès leur parution. Nous réalisons nous-mêmes certaines de ces mises au point mais d'autres sont apportées de l'extérieur. Le service d'étalonnage nécessite aussi le contrôle de la masse volumique de l'air. Pour cela il faudra utiliser, pendant la période 2001-2004, de nouveaux appareillages fondés sur des méthodes de mesure originales aussi bien que classiques, de la pression, de l'humidité et du contenu de l'air en dioxyde de carbone. Nous continuerons à mettre au point des méthodes pour améliorer la mesure de la masse volumique des matériaux utilisés pour les étalons de masse.

2.2 Études sur les balances

En 1998, le BIPM a mis en service sa nouvelle balance à suspensions flexibles, connue sous le nom de FB-2. Celle-ci est fondée sur la technologie des suspensions flexibles que le BIPM a élaborée depuis quinze ans. Elle peut comparer automatiquement jusqu'à huit étalons de 1 kg. Le travail d'optimisation du système d'échange automatique des masses a été aussi important que celui de conception des suspensions flexibles dans l'obtention d'un fonctionnement satisfaisant de la balance. FB-2 est opérationnelle dans l'air comme dans le vide, l'incertitude-type de type A étant de moins de 0,1 µg dans la comparaison de masses de 1 kg.

Comme il est clairement apparu que la balance FB-2 convient parfaitement à la pesée dans le vide et aux travaux de recherche qui y sont liés, nous avons acheté une nouvelle balance du commerce pour les travaux d'étalonnage à venir. Cette nouvelle balance, fabriquée par Metrotec selon notre cahier des charges, complète la balance Mettler-Toledo HK 1000MC acquise il y a quelques années pour remplacer la balance NBS-2 utilisée depuis 1970.

2.3 Stabilité des étalons de masse en platine iridié ou autres

On ne maîtrise pas très bien la stabilité à long terme des étalons de masse en platine iridié, mais le problème est abordé dans diverses expériences conçues dans ce but. Plusieurs d'entre elles, particulièrement prometteuses, sont actuellement en cours et sont fondées sur la mesure de constantes fondamentales de la physique. Ces projets de recherche sont complexes et coûteux et à l'heure actuelle le BIPM ne s'y investit pas. Nous sommes néanmoins très intéressés par ces expériences et nous y participons chaque

fois que notre expérience se révèle utile. Pendant la période allant de 2001 à 2004, la balance FB-2 sera l'un des principaux outils utilisés pour les travaux de recherche destinés à mieux comprendre les effets de surface qui limitent la stabilité des étalons de masse dans l'air et aussi dans le vide.

Les expériences sur le kilogramme ont pour caractéristique commune d'être réalisées dans le vide. Par conséquent, pratiquement toutes recourent à des prototypes de masse capables d'effectuer le transfert entre le vide et la pression atmosphérique avec une incertitude faible. Les questions de poussée de l'air et de stabilité de surface auront une très grande importance. Nous pensons les étudier avec la balance FB-2, mais d'autres méthodes peuvent aussi être utilisées : par exemple, nous sommes sur le point d'acquérir un réfractomètre, qui a été récemment mis au point au BNM-INM et qui a été optimisé pour contrôler les modifications de la masse volumique de l'air.

La stabilité à court terme des étalons de masse en platine iridié dépend en grande partie de leur histoire récente en matière de nettoyage et de conservation. La Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) a utilisé l'ellipsométrie pour étudier les effets du nettoyage et des dépôts qui apparaissent ultérieurement. Cette technique semble particulièrement utile car elle n'est pas destructrice et est potentiellement absolue. Nous prévoyons d'acheter du matériel pour entreprendre des études dans ce domaine. Ce type de méthodes sera aussi appliqué à la surface d'objets en acier inoxydable et en silicium monocristallin.

2.4 Études d'anélasticité et expériences sur la gravitation

Le programme de recherche sur les propriétés anélastiques des matériaux utilisés dans les balances à suspensions flexibles, mis en œuvre au BIPM depuis les années 1980, continuera. Il est souhaitable de mener à bien le travail entrepris en 1988 sur les suspensions en silicium monocristallin, qui n'a pu être poursuivi faute de temps. Il est prévisible que la mesure de la constante de gravitation de Newton, à l'étude à l'heure actuelle, s'étendra jusqu'à la première partie de la période allant de 2001 à 2004.

3 Temps

3.1 Calcul et diffusion du TAI et de l'UTC

Depuis la 20^e Conférence générale en 1995, la qualité des mesures horaires entrant dans le calcul du TAI s'est encore améliorée. Environ 75 % des horloges sont des horloges commerciales à césium de nouvelle génération et des masers à hydrogène actifs et auto-asservis, l'ensemble contribuant pour 89 % au poids total des horloges qui participent au TAI. L'algorithme qui produit le TAI a été modifié deux fois : depuis le 1^{er} janvier 1996, le TAI et

L'UTC sont calculés pour les dates juliennes modifiées se terminant par 4 et 9 (un point tous les cinq jours) ; depuis le 1^{er} janvier 1998, la méthode de pondération a été modifiée, le poids maximal des horloges individuelles étant maintenant fixé de manière relative et l'intervalle de calcul du TAI réduit de deux mois à un mois. Nous tentons constamment d'améliorer l'efficacité et la fiabilité de la collecte des mesures de temps, ainsi que du calcul et de la diffusion du TAI et de l'UTC. Il est prévu d'automatiser davantage les méthodes de travail compte tenu des progrès réalisés récemment au BIPM en matière de communication électronique et de traitement des données.

Comme il est maintenant possible d'obtenir des résultats de comparaisons d'horloges distantes en temps quasi-réel, la question de la production et de la diffusion d'échelles de temps disponibles en temps réel et constituant des prédictions de l'UTC de manière aussi précise que possible deviendra très importante. Nous devons prendre en compte ces nouvelles applications, tout en maintenant le statut actuel des échelles de temps de référence, le TAI et l'UTC.

L'introduction de nouveaux étalons primaires de fréquence, plus exacts, a également amélioré l'exactitude du TAI. La plupart sont des étalons « classiques » à jets de césium ; quelques-uns utilisent des techniques optiques pour la préparation et la détection des atomes. Les premiers résultats d'un étalon primaire utilisant des atomes froids dans une géométrie de fontaine ont été fournis en 1995. C'est un premier pas vers un plus grand nombre et une plus grande variété d'étalons primaires de fréquence, comme cela a été recommandé à plusieurs occasions dans le passé par le Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF) (alors le Comité consultatif pour la définition de la seconde, CCDS). À l'avenir nous espérons recevoir des résultats d'un plus grand nombre d'étalons primaires de fréquence utilisant des atomes froids. Comme ces étalons ne fonctionnent que par intermittence et sur des périodes de temps limitées, il est nécessaire d'adopter des techniques de comparaison adaptées pour les comparer les uns aux autres et répercuter leur exactitude sur le TAI. Plus généralement, devant les incertitudes réduites de ces étalons, et leur nombre croissant, il faudra parvenir à mieux comprendre leur fonctionnement pour optimiser leur utilisation dans le calcul du TAI.

3.2 Comparaisons d'horloges

À l'heure actuelle, les comparaisons d'horloges sont réalisées par la réception des signaux du GPS pour tous les liens utilisés dans le calcul du TAI. Cependant, la méthode des vues simultanées utilisant des récepteurs à canal unique des signaux civils (code C/A) des satellites du GPS est devenue à peine assez précise depuis l'amélioration de la qualité des horloges et la réduction de l'intervalle entre les dates de calcul (passé de dix à cinq jours). À l'avenir, il sera nécessaire d'utiliser tous les satellites possibles du GPS ou du

GPS et du GLONASS et de mettre en œuvre des techniques fondées sur la phase de l'onde porteuse ou le code précis (code P). De tels développements vont de pair avec l'utilisation maintenant généralisée d'éphémérides précises des satellites et de meilleures déterminations des corrections ionosphériques et troposphériques. Nous devons aussi considérer l'emploi des techniques par aller et retour chaque fois qu'elles amélioreront la précision ; leur introduction dans le calcul du TAI est imminente. Étant donné l'amélioration de l'exactitude et de la stabilité des nouvelles horloges et des étalons primaires (par exemple les fontaines à césium), nous serons plus exigeants en matière d'exactitude des comparaisons horaires. En conséquence, l'amélioration des techniques de comparaison d'horloges doit se poursuivre pour s'assurer que leur qualité s'adapte au moins à celles des horloges.

3.3 Systèmes de référence spatio-temporels

En 1997, le BIPM et l'Union astronomique internationale (UAI) ont créé un Comité mixte sur les systèmes de référence spatio-temporels et la métrologie dans le cadre de la relativité générale. Ce Comité a l'intention de présenter ses premières résolutions au CIPM et à l'UAI en l'an 2000. L'amélioration des horloges et les projets visant à en faire fonctionner certaines dans l'espace, ainsi que les raffinements dans les comparaisons d'horloges et le lien entre ces techniques et celles de la géodésie spatiale, ouvrent de nouveaux domaines d'étude faisant appel à des collaborations avec des équipes de recherche travaillant dans les domaines de la physique fondamentale et des systèmes de référence.

3.4 Échelles de temps dynamiques

Le chronométrage des pulsars-milliseconde est l'une des expériences qui exigent des échelles de temps de référence d'une extrême stabilité à long terme. Inversement, il est possible que la stabilité de rotation des pulsars fournisse des renseignements sur la stabilité à très long terme des échelles de temps atomiques. Nous continuerons à nous intéresser à ce domaine et à toute autre technique qui puisse produire des échelles de temps dynamiques (pulsars binaires, éphémérides du système solaire, etc.).

3.5 Laboratoire de mesure du temps

Le laboratoire de mesure du temps s'est considérablement enrichi pour ce qui concerne le nombre et la gamme des récepteurs du temps du GPS et du GLONASS qui y sont en fonctionnement, ceci afin de faire face à la demande croissante d'étalonnages de récepteurs pour le calcul du TAI. L'entretien du matériel à un très haut niveau de qualité et de fiabilité est nécessaire pour

pourvoir aux exigences en matière d'étalonnages. Il est également indispensable que nous améliorions nos compétences dans la mise en œuvre des nouvelles techniques de comparaisons d'horloges, ceci en fonction des ressources du BIPM.

4 Électricité

4.1 Conservation d'une représentation du volt, comparaisons internationales et étalonnages

Les réseaux de jonctions de Josephson de 1 V et de 10 V constituent les étalons de référence fondamentaux du BIPM pour les comparaisons internationales et les étalonnages d'étalons de tension. Le programme en cours de comparaisons de représentations nationales du volt, réalisé à l'aide d'étalons voyageurs de Josephson, se poursuivra. À ce jour, quelque vingt comparaisons de cette sorte ont été réalisées et ce type de comparaison a été sélectionné comme comparaison clé du Comité consultatif d'électricité et magnétisme (CCEM). Pour tous les laboratoires nationaux de métrologie, y compris ceux qui n'ont pas encore pour étalons de référence des réseaux de jonctions de Josephson, les séries de comparaisons bilatérales réalisées au moyen d'étalons à diode de Zener du BIPM seront poursuivies. Un petit nombre d'étalons à diode de Zener est à la disposition des laboratoires nationaux de métrologie qui souhaitent participer à ces comparaisons bilatérales. La partie la plus importante du travail du BIPM dans ce domaine vise à améliorer la stabilité, la fiabilité et la facilité d'emploi de ses étalons de Josephson et à mieux comprendre le comportement de ses étalons voyageurs à diode de Zener. Cette activité sera poursuivie tout comme le service d'étalonnage des étalons à diode de Zener envoyés au BIPM par les laboratoires nationaux de métrologie. Le BIPM ne reçoit, à l'heure actuelle, que très peu de piles de Weston pour étalonnage.

4.2 Conservation d'une représentation de l'ohm, comparaisons internationales et étalonnages

Les étalons à résistance de Hall quantifiée constituent les étalons de référence fondamentaux du BIPM pour les comparaisons internationales et les étalonnages de résistances étalons. Le programme de comparaisons sur place d'étalons de Hall quantifiés sera vraisemblablement moins important que celui des étalons de Josephson car les résistances bobinées, utilisées comme instruments de transfert, sont beaucoup plus stables que les étalons de tension qui ont la même fonction. Le programme de comparaisons bilatérales d'étalons de résistance, utilisant les étalons voyageurs du BIPM, permet la comparaison d'étalons de laboratoire avec une incertitude d'environ 5×10^{-8} . L'étalonnage des étalons de résistance pour les laboratoires nationaux de

métrologie est une partie importante de notre activité et se poursuivra. Pendant la période allant de 2001 à 2004, des améliorations seront apportées aux systèmes à résistance de Hall quantifiée au fur et à mesure des progrès de la physique dans la compréhension de tels systèmes.

4.3 Étalons de capacité liés à la résistance de Hall quantifiée

Depuis 1998, le BIPM conserve des condensateurs étalons dont la capacité est reliée par une chaîne de ponts à impédance à la résistance de Hall quantifiée. Les comparaisons internationales d'étalons de capacité, qui font partie de la liste des comparaisons clés, et les étalonnages font maintenant partie du programme d'activités du BIPM. Ce travail requiert la mesure de la résistance de Hall quantifiée à une fréquence de 1,6 kHz et, par conséquent, notre participation à l'étude du comportement des systèmes de Hall quantifiés dans ce domaine de fréquence.

4.4 Études de la stabilité des étalons électriques et des détecteurs

Nous continuons à utiliser des techniques d'analyse spectrale à basse fréquence, inférieure à 10 Hz, afin d'examiner la stabilité et les caractéristiques de bruit des nanovoltmètres, des détecteurs, des piles étalons et des étalons à diode de Zener. Les résultats d'une étude préliminaire menée en 1998 indiquent que c'est une méthode puissante d'analyse de nombreux types de résultats de mesure qui jusqu'à maintenant n'avaient pas été examinés de cette manière. Ce travail se poursuivra.

5 Radiométrie et photométrie

5.1 Radiométrie

La référence étalon pour toutes les mesures effectuées au BIPM en radiométrie et photométrie est le radiomètre cryogénique. La mise au point et la caractérisation de récepteurs de transfert stables se poursuivent, avec des projets d'extension aux domaines spectraux infrarouge et ultraviolet.

La source à corps noir à caloduc au sodium fonctionnant à une température proche de 1000 °C, que l'on prévoit d'installer en 1999, sera utilisée pour établir une échelle de sensibilité spectrale dans l'infrarouge proche. Des radiomètres à filtres caractérisés à des longueurs d'onde du domaine visible seront étalonnés par rapport au radiomètre cryogénique et utilisés pour déterminer la température du corps noir. La luminance spectrale du corps noir pourra alors être calculée à partir de cette information et de la formule de Planck. On utilisera ensuite ce résultat pour étalonner d'autres radiomètres à filtres dans l'infrarouge proche. Des radiomètres à filtres étalonnés de cette

façon, à des longueurs d'onde espacées à peu près régulièrement, permettent d'effectuer des étalonnages à d'autres longueurs d'onde, par interpolation. Ce travail sera étendu pour permettre des mesures d'éclairement spectral se référant à la source à corps noir et donc au radiomètre cryogénique.

En 1999, le BIPM commencera à utiliser le tour à outil au diamant pour des travaux qui se poursuivront après 2001 et dont le but est la fabrication précise des diaphragmes requis en radiométrie et en photométrie ; on mesurera la surface de l'ouverture à l'aide de techniques de pointe.

Le BIPM va continuer de participer à des comparaisons clés de radiométrie choisies par le Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR) et à être parfois le laboratoire pilote.

5.2 Photométrie

Après une période de transition qui commencera en 1999, les étalons photométriques du BIPM seront totalement fondés sur des récepteurs liés au radiomètre cryogénique à l'aide de méthodes mises au point récemment. Selon ces procédés, des photomètres pourvus de diaphragmes précis sont étalonnés sur tout le spectre par rapport au radiomètre cryogénique, afin de déterminer leur sensibilité lumineuse. Des mesures d'intensité lumineuse peuvent alors être réalisées en plaçant ces photomètres à une distance connue d'une source. Ces photomètres étalonnés sont également utilisés pour déterminer le flux lumineux introduit à partir d'une source extérieure dans la sphère d'intégration du BIPM. Ce flux, une fois connu, est utilisé pour étalonner des lampes, de flux lumineux inconnu, placées à l'intérieur de la sphère. Les étalons traditionnels fondés sur un groupe de lampes ne seront alors plus utilisés. Il est probable que ceci améliorera la stabilité et la fiabilité des étalons de flux lumineux et d'intensité lumineuse du BIPM. L'un des avantages de ces nouvelles méthodes est qu'elles peuvent être mises en œuvre facilement et à n'importe quel moment. La mise en place de ces nouvelles méthodes se poursuivra au cours de la période 2001-2004. Le BIPM continuera à fournir aux laboratoires nationaux de métrologie qui le lui demanderont des services d'étalonnage de lampes pour les grandeurs photométriques.

Le BIPM a été le laboratoire pilote pour la comparaison clé de sensibilité lumineuse et il est prêt à recommencer. Il pourra également être le laboratoire pilote pour d'autres comparaisons clés de lampes, de flux lumineux ou d'intensité lumineuse, chaque fois que le CCPR le jugera nécessaire.

6 Rayonnements ionisants

6.1 Dosimétrie

Un grand nombre de comparaisons dans le domaine de la dosimétrie sont réalisées au cours de la période quadriennale actuelle, car les laboratoires nationaux de métrologie se mettent à jour afin que leurs résultats de dosimétrie, particulièrement ceux obtenus dans le faisceau du ^{60}Co , soient prêts à figurer dans la base de données des comparaisons clés. Cette tendance va vraisemblablement se poursuivre pour les comparaisons dans la gamme des rayons x, car beaucoup de comparaisons antérieures datent de plus de dix ans. Des étalonnages périodiques d'instruments de transfert, utilisés comme étalons secondaires par les laboratoires nationaux de métrologie qui n'ont pas d'étalon primaire, se poursuivront. Le BIPM participe également à des comparaisons de dosimètres passifs, particulièrement pour les Secondary Standards Dosimetry Laboratories (SSDL) de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) et de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). L'étalon de l'AIEA est traçable à celui du BIPM.

Un étalon ionométrique de dose absorbée dans l'eau dans le faisceau du ^{60}Co a été mis en œuvre au BIPM et comparé aux étalons d'un certain nombre de laboratoires nationaux fondés sur d'autres méthodes. En supplément, un étalon calorimétrique en graphite sera mis au point au cours des quatre prochaines années. Ceci renforcera la robustesse des résultats de la comparaison clé de dose absorbée dans l'eau. Le BIPM a mis en place une comparaison internationale pour les laboratoires nationaux de métrologie qui travaillent avec des doses absorbées élevées (de l'ordre du kGy). Il est probable que ceci conduira à effectuer d'autres comparaisons de ce type.

Le BIPM utilise un instrument de transfert pour les comparaisons de rayonnements x de haute énergie fondées sur des mesures ionométriques, qui sera à terme remplacé par un étalon calorimétrique pour les hautes énergies, actuellement en cours de mise au point. On s'attend déjà à ce que des comparaisons à haute énergie utilisant ce nouveau système de transfert du BIPM soient très demandées. Une étude sera menée pour appréhender les implications qu'entraînerait pour le BIPM l'extension de ses comparaisons aux faisceaux d'électrons de haute énergie.

6.2 Radionucléides

Le Système international de référence (SIR) continue d'enrichir sa base de données et de fournir des valeurs de référence de comparaisons clés, en particulier pour les radionucléides émetteurs de rayonnement gamma. Les émetteurs de rayonnement beta purs sont envoyés au BIPM pour y être analysés et des valeurs de référence seront disponibles à l'avenir dans ce domaine. On a encore besoin de travailler dans le domaine des radionucléides

qui présentent des schémas de désintégration plus complexes avant de pouvoir les intégrer au SIR. Le programme de travail du SIR se poursuivra.

L'organisation et l'analyse de comparaisons régulières utilisant un radionucléide spécifique continuent d'être une des tâches majeures du BIPM. Ces comparaisons sont sélectionnées par la Section II du Comité consultatif pour les rayonnements ionisants (CCRI), en réponse aux demandes des laboratoires nationaux de métrologie. Chaque comparaison est liée au SIR par le BIPM de sorte que les valeurs des comparaisons des laboratoires nationaux de métrologie peuvent être ajoutées à la base de données du SIR.

Des travaux de recherche continueront dans le domaine de la mise au point de nouvelles méthodes de détermination d'activité : la méthode du rapport des coïncidences triples aux coïncidences doubles et l'identification des impuretés dans les solutions de radionucléides par spectroscopie à l'aide d'un récepteur au germanium d'extrême pureté, suivie de l'application aux mesures des corrections correspondantes.

7 Métrologie en chimie

Le programme de métrologie en chimie approuvé par le CIPM en 1998 commencera par des travaux de remise en état d'un laboratoire pendant la deuxième moitié de 1999. Il est prévu de recruter une des quatre personnes prévues pour ce travail au cours de l'année 2000, et les trois autres au cours de l'année 2001. Le programme détaillé des activités sera défini en consultation avec des spécialistes du Comité consultatif pour la quantité de matière (CCQM) au cours des années 1999 et 2000 ; il se situera dans le domaine de l'analyse des gaz. Il est trop tôt pour donner ici des précisions sur ce programme, mais il comprendra très certainement la préparation de mélanges de gaz de référence par pesée et l'analyse de mélanges de gaz, tout d'abord par chromatographie en phase gazeuse et, en temps utile, par spectrométrie de masse, dans le but de participer à des comparaisons clés le plus tôt possible.

8 Services généraux et scientifiques des laboratoires

8.1 Atelier de mécanique

L'installation de l'atelier de mécanique dans le nouveau bâtiment (*voir* les commentaires sur le point 6 de l'ordre du jour de la Convocation, Annexe A) devrait se dérouler au cours de l'année 2001, ainsi, la plupart des dépenses budgétaires liées à ce poste devraient être engagées avant le début de la période 2001 à 2004. Le nouveau bâtiment, qui comprendra enfin des locaux pour l'atelier de mécanique conformes aux normes actuelles de sécurité et de commodité, devrait augmenter considérablement la productivité du service ; à

l'heure actuelle, l'atelier est réparti dans trois bâtiments différents. L'utilisation de la conception assistée par ordinateur et de machines à commandes numériques demeurera fondamentale pour son bon fonctionnement. Le nouveau bâtiment disposera d'un espace climatisé pour la métrologie et également d'un emplacement pour les machines à mesurer les formes et les dimensions ; celles-ci fonctionnent à l'heure actuelle dans des conditions moins qu'idéales. Le nouveau tour à outil au diamant, offert au BIPM en 1998 par une fondation japonaise sans but lucratif (Japan Society for the Promotion of Machine Industry), sera utilisé pour la fabrication de prototypes du kilogramme en platine iridié et pour d'autres applications qui exigent une extrême précision. Dans la mesure des contraintes budgétaires, on veillera à maintenir l'atelier de mécanique équipé des machines-outils et des instruments de mesure les plus modernes et les plus efficaces pour lui permettre de répondre aux exigences d'un laboratoire de métrologie.

8.2 Mesures de température et de pression

Les possibilités en matière d'étalonnages de routine dans les domaines de la thermométrie à la température ambiante et des pressions proches de la pression atmosphérique seront conservées en tant que services internes rendus aux autres sections du BIPM.

8.3 Informatique

Il est de plus en plus nécessaire de disposer d'une infrastructure informatique interne au BIPM efficace et à jour. Cela est indispensable, non seulement pour le travail scientifique, mais également pour les activités de secrétariat et d'édition, la communication avec l'extérieur et la base de données du BIPM sur les comparaisons clés (*voir* ci-dessous). Une partie importante du travail de la section du temps est fondée sur des résultats envoyés régulièrement par quelque soixante laboratoires et observatoires du monde entier. Il est essentiel que le système de réception et de traitement de ces fichiers soit fiable et efficace.

Le site Web du BIPM continuera d'offrir des renseignements pratiques et constamment à jour sur le BIPM, la Convention du Mètre, les différents Comités consultatifs du CIPM et leurs publications. Il propose aussi des liens avec les sites Web de certains laboratoires nationaux de métrologie, ainsi qu'un « miroir » du site du NIST qui renferme la liste des constantes fondamentales du CODATA.

8.4 Base de données du BIPM sur les comparaisons clés

L'accord de reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de métrologie et des certificats d'étalonnage et de mesurage émis par les laboratoires nationaux de métrologie requiert la création d'une base de données unique qui devrait contenir les résultats des comparaisons clés, fondement technique de cet accord. La base de données est en cours d'élaboration au NIST, puis elle devrait être transférée au BIPM. Elle sera progressivement mise à jour avec les résultats des comparaisons clés au fur et à mesure de leur approbation par les Comités consultatifs. Les comparaisons clés seront celles qui sont conduites par les Comités consultatifs, les organisations régionales de métrologie et par le BIPM. On s'attend à ce que la base de données prenne de l'importance et il faudra prévoir l'évolution de sa structure et de sa portée. Les possibilités en matière de mesures et d'étalonnages des laboratoires nationaux de métrologie participant à l'accord seront aussi incluses dans cette base de données.

9 Services administratifs généraux

9.1 Finance, personnel et administration générale

Les finances, le personnel et l'administration générale sont sous la responsabilité d'une personne diplômée de l'université, assistée de trois collaboratrices à temps partiel, dont le travail confondu équivaut à 1,7 collaboratrices. En conséquence, le nombre total de personnes affectées à l'administration aujourd'hui n'est pas sensiblement plus élevé qu'il y a trente ans et constitue le minimum absolu pour que ce service fonctionne convenablement.

9.2 Secrétariat

Le secrétariat du BIPM est composé de deux personnes diplômées de l'université, la secrétaire assistante personnelle du directeur et la bibliothécaire qui collabore également aux publications du BIPM et aux traductions, ainsi que de deux secrétaires. Les nouveaux outils de bureautique sont utilisés pour tout le travail de frappe et d'édition et le secrétariat est évidemment relié au réseau interne d'ordinateurs. L'effectif total du secrétariat est tombé de cinq personnes à quatre personnes depuis cinq ans, après le départ à la retraite d'une troisième personne diplômée de l'université, qui n'a pas été remplacée. Il n'est pas prévu d'augmenter l'effectif du secrétariat.

9.3 Publications

Les publications sont une composante essentielle des activités du BIPM et tous les moyens modernes de communication sont résolument employés. Les comptes rendus de la Conférence générale, ceux du CIPM et des Comités consultatifs, et les éditions successives de la brochure du SI sont les principales publications officielles du BIPM. Produites en français et en anglais, elles sont distribuées aux États membres, aux laboratoires nationaux de métrologie et aussi largement que possible au sein de la communauté de la métrologie. Ces documents sont disponibles gratuitement sur le site Web du BIPM et les volumes imprimés sont en vente à la librairie électronique du BIPM (accessible sur ce site). L'autre publication importante du BIPM est la revue *Metrologia*, maintenant dans sa trente-cinquième année de publication. Depuis 1997, on peut également consulter *Metrologia* par Internet. La version électronique est disponible gratuitement pour les abonnés. L'extension de l'accès électronique à des volumes antérieurs est en préparation, ceci afin de créer un outil de référence électronique puissant et totalement accessible. Il existe déjà une base de données accessible qui contient les titres et les noms d'auteurs depuis le volume 1. *Metrologia* paraît maintenant six fois par an : quatre numéros normaux, destinés à des articles couvrant une vaste étendue de sujets liés à la métrologie et à des rapports internationaux contenant les résumés des résultats des comparaisons clés ; un numéro spécial consacré à des articles de synthèse commandés et couvrant un sujet spécifique ; et un autre numéro spécial rassemblant les articles d'une conférence d'intérêt métrologique. Le volume annuel moyen de *Metrologia* est d'environ 600 pages, mais récemment ce chiffre a presque doublé du fait de la publication des comptes rendus d'une conférence. Le personnel responsable des publications est dirigé par le rédacteur de *Metrologia* et comprend le rédacteur adjoint de *Metrologia*, la bibliothécaire, pour une partie de son temps, et une secrétaire à temps partiel.

En plus de sa contribution aux publications du BIPM, le personnel scientifique publie les résultats de son travail dans des revues avec comité de lecture, y compris, mais pas exclusivement *Metrologia*, et les présente aussi lors de conférences scientifiques. Au cours de ces dernières années, le personnel du BIPM a publié annuellement entre vingt et trente articles dans des revues soumises à référés et une douzaine de publications dans des comptes rendus de congrès.

9.4 Bibliothèque

La bibliothèque du BIPM est un maillon de l'infrastructure du laboratoire, essentiel à la poursuite efficace du travail scientifique. Le nombre d'abonnements à des revues reste pratiquement constant, mais certaines revues spécialisées sont abandonnées au profit de certaines autres, au fur et à

mesure de l'évolution de l'intérêt qu'elles présentent et aussi de nos travaux. La création d'une nouvelle section de métrologie en chimie amènera la bibliothèque à s'enrichir dans ce nouveau domaine, mais afin de maîtriser les coûts, cela se fera aux dépens des revues les moins utilisées dans les domaines traditionnels d'activité du BIPM. Malheureusement, l'expérience a montré que le coût des abonnements à des revues scientifiques augmente à un taux supérieur à celui de l'inflation. C'est ainsi que les revues les plus chères sont abandonnées, sauf si elles constituent une partie du noyau de la collection du BIPM. L'abonnement à des listes de contenus de certaines revues est un moyen efficace et économique de se tenir au courant des publications qui ne sont pas conservées à la bibliothèque.

9.5 Voyages et transport de matériel

Au cours des dernières années, les frais de voyage et de transport de matériel sont passés de 1,8 % du budget annuel en 1990 à 3,4 % en 1998. Cette augmentation provient en grande partie des frais supplémentaires engendrés par le programme maintenant beaucoup plus large des comparaisons internationales réalisées en transportant des étalons de référence du BIPM dans les laboratoires nationaux. Les frais de transport de lasers asservis sur l'iode, d'étalons de tension fondés sur l'effet Josephson et d'étalons fondés sur l'effet Hall quantique sont la cause majeure de cette augmentation. Les bénéfices qu'en tirent les laboratoires nationaux dépassent cependant de loin cette petite augmentation de frais pour le BIPM, ainsi ces activités ou des activités voisines seront poursuivies. Les frais administratifs liés aux formalités douanières peuvent être parfois lourds, mais ceci fait partie d'un problème plus vaste qui semble ne pas avoir de solution globale et qui est lié aux formalités douanières rencontrées lors des échanges internationaux d'étalons de mesure. Les voyages du personnel scientifique et du directeur dans les laboratoires nationaux, les congrès et les réunions liées à la métrologie, sont essentiels aux activités du BIPM et se poursuivront. Le coût le plus élevé de ces déplacements n'est pas financier, mais relève plutôt du temps passé. Le nombre d'invitations à participer à des réunions, des congrès et visiter des laboratoires nationaux continue d'augmenter ; le personnel du BIPM est amené à en refuser beaucoup par manque de temps.

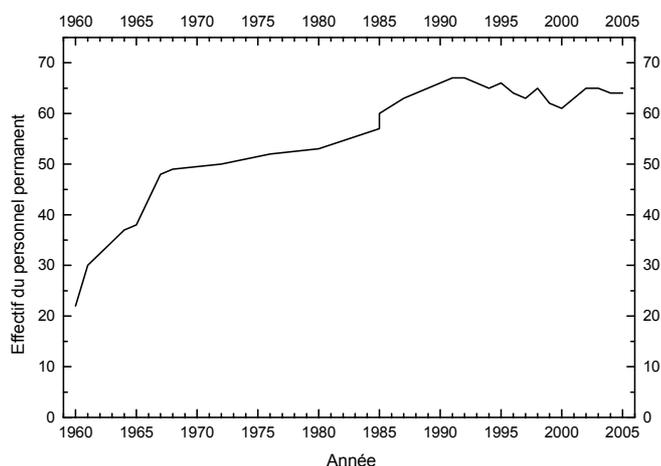
10 Bâtiments et parc

Le Pavillon de Breteuil est un lieu historique ; le Pavillon lui-même ainsi que les jardins qui l'entourent doivent donc être entretenus avec beaucoup de soin. L'entretien de l'ensemble des bâtiments, construits depuis l'époque de Louis XIV (le Pavillon de Breteuil) jusqu'à nos jours, est non seulement coûteux mais fait appel à un large éventail de métiers et de techniques. Le bon fonctionnement du conditionnement de l'air dans les laboratoires est une

tâche majeure qui demande une surveillance continue et du matériel récent, mais il est indispensable à la métrologie moderne. La construction du nouveau bâtiment pour l'atelier, des bureaux et des salles de réunions supplémentaires, complète le plan à long terme de construction qui avait été présenté à la 17^e Conférence générale en 1983, et repris à chacune des Conférences suivantes. Il n'y a pas d'autres projets d'extension ou de construction de bâtiment au BIPM. Il faudra néanmoins continuer certaines rénovations importantes des bâtiments requises de temps en temps, soit pour faire face à des changements de programme de travail, telle la transformation d'une partie du bâtiment des rayonnements ionisants pour la métrologie en chimie, ou simplement la rénovation d'anciennes installations.

11 Personnel

Au 1^{er} janvier 1999 l'effectif permanent du BIPM s'élevait à 62 personnes pour un travail à plein temps, contre 66 personnes au 1^{er} janvier 1995. Ce personnel est réparti selon les différentes sections représentées dans l'organigramme qui se trouve à la page suivante. L'organigramme mentionne les chercheurs associés employés pour une durée déterminée, généralement de deux ans, et indique le personnel à temps partiel et contractuel. L'évolution de l'effectif du personnel depuis 1960 et les prévisions jusqu'à l'année 2004 sont données dans la figure ci-dessous. Au 1^{er} janvier 1999, l'âge moyen de l'ensemble du personnel était de 47 ans et celui du personnel scientifique de 46 ans (contre 47 au 1^{er} janvier 1995).



12 Contribution à la Caisse de retraite

Une étude actuarielle, conduite en 1994, avait montré que le nombre de retraités du BIPM doublerait entre 1994 et 2010. Afin de faire face à cette situation, le CIPM avait décidé en 1994 d'augmenter la contribution budgétaire annuelle à la Caisse de retraite d'un montant équivalent à 2 % de la masse salariale, chaque année de 1996 à 2008.

13 Dotation annuelle du Bureau international

Dans la Convocation de la 21^e Conférence générale des poids et mesures, le Comité international des poids et mesures a demandé à la Conférence d'adopter les sommes équivalentes en euros des dotations suivantes pour les années 2001 à 2004 :

2001 :	31 596 000 francs-or
2002 :	32 228 000 francs-or
2003 :	32 873 000 francs-or
2004 :	33 530 000 francs-or.

Ces sommes sont justifiées en détail dans la Convocation de la 21^e Conférence générale ; il n'est donc pas nécessaire d'y revenir dans ce document.

On trouvera ci-après l'estimation générale des dépenses à engager pour assurer le programme de travail exposé dans ce document. Les têtes de chapitre (dépenses de fonctionnement, de laboratoire, de personnel, etc.) sont celles qui figurent dans la partie financière du « Rapport annuel aux Gouvernements des Hautes Parties contractantes sur la situation administrative et financière du Bureau international des poids et mesures » envoyé chaque année aux Gouvernements des États membres de la Convention du Mètre. Les sommes sont données en milliers de francs-or*.

Aux sections 13.1 à 13.8 qui suivent, figurent les dépenses de laboratoire pour les projets décrits dans les sections 1 à 8 de ce document. Elles sont suivies par les dépenses pour les services généraux, comprenant les publications et les voyages, section 9, par les dépenses d'entretien et de rénovation des bâtiments, section 10, par les dépenses de personnel, section 11, puis par la contribution à la Caisse de retraite, section 12. Dans ces tableaux, les prévisions de dépenses sont données globalement pour les quatre années 2001-2004.

* 1 franc-or = 1,814 52 franc français.

1 euro = 6,55 957 francs français.

Les budgets annuels pour les années 2001 à 2004 figurent à la section 13.13. La répartition correspondante des dépenses par catégorie est donnée sous forme graphique à la section 13.14. Les prévisions budgétaires annuelles font apparaître des sommes totales supérieures d'environ 5 % aux montants des dotations. Cet écart correspond aux revenus estimés des intérêts des actifs disponibles et à des recettes annexes provenant de certains étalonnages, de la vente de prototypes en platine iridié, etc. (*voir* le « Rapport annuel aux Gouvernements des Hautes Parties contractantes sur la situation administrative et financière du Bureau international des poids et mesures » pour les années les plus récentes).

	Estimation des dépenses (en milliers de francs-or)
13.1 Longueurs	2 885
Comparaisons internationales	580
Radiations recommandées dans la mise en pratique de la définition du mètre	1 585
Gravimétrie	430
Métrologie dimensionnelle : nanométrie	290
13.2 Masse	2 472
Fabrication et étalonnage d'étalons de masse	620
Études sur les balances	620
Stabilité des étalons de masse en platine iridié	395
Études sur l'anélasticité et expériences sur la gravitation	837
13.3 Temps	1 648
Calcul et diffusion du TAI et de l'UTC	660
Comparaisons d'horloges	346
Systèmes de référence spatio-temporels	35
Échelles de temps dynamiques	35
Laboratoire de mesure du temps	572
13.4 Électricité	3 709
Conservation d'une représentation du volt, comparaisons internationales et étalonnages	930
Conservation d'une représentation de l'ohm, comparaisons internationales et étalonnages	1 110
Étalons de capacité liés à la résistance de Hall quantifiée	1 300
Études de la stabilité des étalons électriques et des détecteurs	369
13.5 Radiométrie et photométrie	2 885
Radiométrie	2 020
Photométrie	865

	Estimation des dépenses (en milliers de francs-or)				
13.6 Rayonnements ionisants					2 472
Dosimétrie				1 122	
Radionucléides				1 350	
13.7 Métrologie en chimie					2 472
13.8 Services généraux et scientifiques des laboratoires					5 227
Atelier de mécanique				1 648	
Mesures de température et de pression				600	
Informatique				1 879	
Base de données du BIPM sur les comparaisons clés				1 100	
13.9 Services administratifs généraux					14 871
Services généraux				5 673	
Secrétariat				2 413	
Publications				1 198	
Bibliothèque				1 697	
Voyages et transport de matériel				3 890	
13.10 Bâtiments et parc					3 232
13.11 Personnel					74 222
Salaires				57 225	
Allocations familiales et sociales				11 445	
Charges sociales				5 552	
13.12 Contribution à la Caisse de retraite					18 921
13.13 Budget pour chacune des années 2001-2004					
Récapitulation d'ensemble (en milliers de francs-or)					
	2001	2002	2003	2004	4 années
A. Personnel (13.11)	17 703	18 446	18 907	19 166	74 222
B. Contribution à la Caisse de retraite (13.12)	4 093	4 557	4 953	5 318	18 921
C. Services généraux (13.9)	3 543	3 623	3 847	3 858	14 871
D. Dépenses de labo- ratoires (13.1 à 13.8)	5 767	5 883	6 000	6 120	23 770
E. Bâtiments (13.10)	1 277	1 055	500	400	3 232
F. Divers, imprévus	946	404	412	421	2 183
Totaux	33 329	33 968	34 619	35 283	137 199

13.13.1 Services généraux (en milliers de francs-or)
(détail de 13.9)

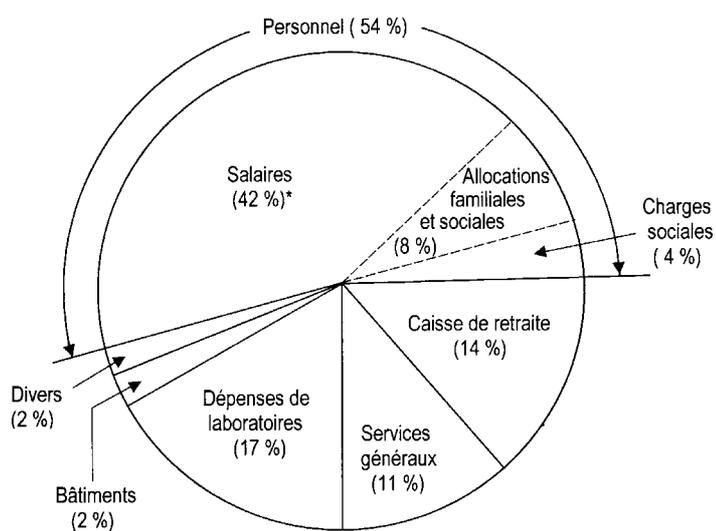
	2001	2002	2003	2004	4 années
Chauffage, eau, électricité	510	525	541	557	2 133
Assurances	110	116	121	127	474
Publications	284	290	296	328	1 198
Frais de bureau	581	593	622	617	2 413
Voyages et transport de matériel	938	957	1 040	955	3 890
Entretien courant	643	656	732	769	2 800
Bibliothèque	412	420	428	437	1 697
Bureau du Comité	65	66	67	68	266
Totaux	3 543	3 623	3 847	3 858	14 871

13.13.2 Dépenses de laboratoire (en milliers de francs-or)
(détail de 13.1 à 13.8)

	2001	2002	2003	2004	4 années
Longueurs	700	714	728	743	2 885
Masse	600	612	624	636	2 472
Temps	400	408	416	424	1 648
Électricité	900	918	936	955	3 709
Radiométrie et photométrie	700	714	728	743	2 885
Rayonnements ionisants	600	612	624	636	2 472
Métrologie en chimie	600	612	624	636	2 472
Atelier	400	408	416	424	1 648
Services généraux et scien- tifiques des laboratoires	867	885	904	923	3 579
Totaux	5 767	5 883	6 000	6 120	23 770

13.14 Représentation graphique des prévisions de dépenses pour les années 2001-2004

Récapitulation d'ensemble, incluant le détail des dépenses de personnel (13.13)



* pourcentage du budget total des 4 années (arrondi)

Liste des sigles utilisés dans le présent volume List of acronyms used in the present volume

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

AIEA/IAEA	Agence internationale de l'énergie atomique/International Atomic Energy Agency
AIG/IAG	Association internationale de géodésie/International Association of Geodesy
AISM/IALA	Association internationale de signalisation maritime/ International Association of Lighthouse Authorities
AIST	Agency of Industrial Science and Technology, Tokyo et Tsukuba (Japon)
AOAC	Association of Official Analytical Chemists
APMP	Asia-Pacific Metrology Programme
BIH	Bureau international de l'heure
BIML	Bureau international de métrologie légale
BIPM	Bureau international des poids et mesures/International Bureau of Weights and Measures
BMwA	Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Vienne (Autriche)
BNM	Bureau national de métrologie, Paris (France)
BNM-INM	Bureau national de métrologie, Institut national de métrologie, Paris (France)
BNM-LCIE	Bureau national de métrologie, Laboratoire central des industries électriques, Fontenay-aux-Roses (France)
BNM-LPTF	Bureau national de métrologie, Laboratoire primaire du temps et des fréquences, Paris (France)
BRML	Bureau roumain de la métrologie légale, Bucarest (Roumanie)
CC	Comité consultatif du CIPM/Consultative Committee of the CIPM
CCAUV	Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations/Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration
CCDM*	Comité consultatif pour la définition du mètre/Consultative Committee for the Definition of the Metre, <i>voir</i> CCL

* Les laboratoires ou organisations marqués d'un astérisque soit n'existent plus soit figurent sous un autre sigle.
Organizations marked with an asterisk either no longer exist or operate under a different acronym

CCDS*	Comité consultatif pour la définition de la seconde/ Consultative Committee for the Definition of the Second, <i>voir</i> CCTF
CCE*	Comité consultatif d'électricité/Consultative Committee for Electricity, <i>voir</i> CCEM
CCEM	(ex CCE) Comité consultatif d'électricité et magnétisme/ Consultative Committee for Electricity and Magnetism
CCEMRI*	Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants/Consultative Committee for Standards of Ionizing Radiation, <i>voir</i> CCRI
CCIR	Comité consultatif international des radiocommuni- cations/International Radio Consultative Committee
CCL	(ex CCDM) Comité consultatif des longueurs/Consultative Committee for Length
CCM	Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées/Consultative Committee for Mass and Related Quantities
CCPR	Comité consultatif de photométrie et radiométrie/ Consultative Committee for Photometry and Radiometry
CCQM	Comité consultatif pour la quantité de matière/Consultative Committee for Amount of Substance
CCRI	(ex CCEMRI) Comité consultatif des rayonnements ionisants/Consultative Committee for Ionizing Radiation
CCT	Comité consultatif de thermométrie/Consultative Committee for Thermometry
CCTF	(ex CCDS) Comité consultatif du temps et des fréquences/Consultative Committee for Time and Frequency
CCU	Comité consultatif des unités/Consultative Committee for Units
CEI/IEC	Commission électrotechnique internationale/International Electrotechnical Commission
CEM	Centro Español de Metrología, Madrid (Espagne)
CENAM	Centro Nacional de Metrología, Mexico (Mexique)
CETIAT	Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques, Villeurbanne (France)
CGPM	Conférence générale des poids et mesures/General Conference on Weights and Measures
CIE	Commission internationale de l'éclairage/International Commission on Illumination
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medio-ambientales y Tecnológicas, Madrid (Espagne)
CIML	Comité international de métrologie légale
CIPM	Comité international des poids et mesures/International Committee for Weights and Measures

CITAC	Cooperation on International Traceability in Analytical Chemistry
CMA/MIKES	Mittatekniikan Keskus/Centre for Metrology and Accreditation, Helsinki (Finlande)
CMI	Český Metrologický Institut/Czech Metrological Institute, Prague et Brno (Rép. tchèque)
CMS/ITRI	Centre for Measurement Standards of the Industrial Technology Research Institute, Hsinchu (Taiwan)
CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche, Turin (Italie)
CODATA	Committee on Data for Science and Technology
COOMET	Coopération métrologique entre les États d'Europe centrale/Cooperation in Metrology among the Central European Countries
CORM	Council for Optical Radiation Measurements (États-Unis)
CPEM	Conference on Precision Electromagnetic Measurements
CRL	Communications Research Laboratory, Tokyo (Japon)
CSIR-NML	Council for Scientific and Industrial Research, National Metrology Laboratory, Pretoria (Afrique du Sud)
CSIRO-NML	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, National Measurement Laboratory, Lindfield (Australie)
DFM	Danish Institute of Fundamental Metrology, Lyngby (Danemark)
ENEA	Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, Rome (Italie)
ENS	École normale supérieure, Paris (France)
ETL	Electrotechnical Laboratory, Tsukuba (Japon)
EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
GT-RF	Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences du CCEM/CCEM Working Group on Radiofrequency Quantities
GUM	Główny Urząd Miar/Central Office of Measures, Varsovie (Pologne)
HUT	Helsinki University of Technology, Helsinki (Finlande)
IAEA*	<i>voir</i> AIEA
IAG*	<i>voir</i> AIG
IALA*	<i>voir</i> AISM
IAU*	<i>voir</i> UAI
ICAO*	<i>voir</i> OACI
IEC*	<i>voir</i> CEI
IEN	Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, Turin (Italie)
IERS	Service international de la rotation terrestre/International Earth Rotation Service

IFCC	Fédération internationale de chimie clinique/International Federation of Clinical Chemistry
IGS	International GPS Service for Geodynamics
ILAC	International Laboratory Accreditation Conference
IMEKO	International Measurement Confederation
IMGC	Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Turin (Italie)
IMO*	<i>voir</i> OMI
INM*	<i>voir</i> BNM-INM
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, Rio de Janeiro (Brésil)
INN	Instituto Nacional de Normalización, Santiago (Chili)
INTA	Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Madrid (Espagne)
INTI	Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Buenos Aires (Argentine)
IPQ	Instituto Português da Qualidade, Lisbonne (Portugal)
IRA	Institut universitaire de radiophysique appliquée, Lausanne (Suisse)
IRD*	<i>voir</i> LNMRI
IRMM	Institut des matériaux et mesures de référence, Commission européenne/Institute for Reference Materials and Measurements, European Commission
ISO	Organisation internationale de normalisation/International Organization for Standardization
ISO-REMCO	Organisation internationale de normalisation, Comité pour les matériaux de référence/International Organization for Standardization, Committee on Reference Materials
ITU*	<i>voir</i> UIT
IUGG*	<i>voir</i> UGGI
IUPAC*	<i>voir</i> UICPA
IUPAP*	<i>voir</i> UIPPA
JCGM	Comité commun pour les guides en métrologie/Joint Committee for Guides in Metrology
JCRB	Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM/Joint Committee of the Regional Metrology Organizations and the BIPM
JILA	Joint Institute for Laboratory Astrophysics, Boulder CO (États-Unis)
JV	Justervesenet, Oslo (Norvège)
KRISS	Korea Research Institute of Standards and Science, Taejeon (Rép. de Corée)
LCIE*	<i>voir</i> BNM-LCIE
LGC	Laboratory of the Government Chemist, Teddington (Royaume-Uni)
LNM/NMI	Laboratoire national de métrologie/National Metrology Institute

LNMRI	Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, Rio de Janeiro (Brésil)
LPTF*	<i>voir</i> BNM-LPTF
MENAMET	Middle East Metrology Organization
Metas	(ex OFMET) Office fédéral de métrologie et d'accréditation, Wabern (Suisse)
MIKES	<i>voir</i> CMA
MIT	Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA (États-Unis)
MRA	Arrangement de reconnaissance mutuelle/Mutual Recognition Arrangement
MSL-IRL	Measurement Standards Laboratory of New Zealand, Lower Hutt (Nouvelle-Zélande)
NEWRAD	New Developments and Applications in Optical Radiometry Conference
NIM	National Institute of Metrology, Beijing (Chine)
NIMT	National Institute of Metrology of Thailand, Bangkok (Thaïlande)
NIMTT	National Institute of Measurement and Testing Technology, Sichuan (Chine)
NIS	National Institute for Standards, Le Caire (Égypte)
NIST	National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg (États-Unis)
NMI	<i>voir</i> LNM
NMi-VSL	Nederlands Meetinstituut, Van Swinden Laboratorium, Delft (Pays-Bas)
NML	<i>voir</i> CSIR
NML	<i>voir</i> CSIRO
NORAMET	North American Metrology Cooperation
NPL	National Physical Laboratory, Teddington (Royaume-Uni)
NRC-CNRC*	<i>voir</i> NRC
NRC-INMS	Conseil national de recherches du Canada, Institut des étalons nationaux de mesure/National Research Council of Canada, Institute for National Measurement Standards, Ottawa (Canada)
NRCCRM	National Research Centre for Certified Reference Materials, Beijing (Chine)
NRLM	National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba (Japon)
OACI/ICAO	Organisation de l'aviation civile internationale/ International Civil Aviation Organization
OFMET*	Office fédéral de métrologie/Eidgenössisches Amt für Messwesen, Wabern (Suisse), <i>voir</i> Metas
OIML	Organisation internationale de métrologie légale

OMC/WTO	Organisation mondiale du Commerce/World Trade Organization
OMH	Országos Mérésügyi Hivatal, Budapest (Hongrie)
OMI/IMO	Organisation maritime internationale/International Maritime Organization
OMS/WHO	Organisation mondiale de la santé/World Health Organization
PSB	(ex SISIR) Singapore Productivity and Standards Board (Singapour)
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig et Berlin (Allemagne)
RMO	<i>voir</i> ORM
SADCMET	Southern African Development Community Cooperation in Measurement Traceability
SCL	Standards and Calibration Laboratory (Hong Kong)
SIM	Système interaméricain de métrologie/Sistema Interamericano de Metrologia
SIP	Société genevoise d'instruments de physique, Genève (Suisse)
SISIR*	Singapore Institute of Standards and Industrial Research (Singapour), <i>voir</i> PSB
SIRIM	Standards and Industrial Research Institute, Shah Alam (Malaisie)
SMU	Slovenský Metrologický Ústav/Slovak Institute of Metrology, Bratislava (Slovaquie)
SP	(ex Statens Provningsanstalt) SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut/Swedish National Testing and Research Institute, Borås (Suède)
SSDL	Secondary Standards Dosimetry Laboratories
STEP	Satellite Test of the Equivalence Principle Meeting
SURAMET	Coopération métrologique sud-américaine (Argentine, Brésil, Chili, Paraguay et Uruguay)
TUG	Technical University, Graz (Autriche)
UAI/IAU	Union astronomique internationale/International Astronomical Union
UGGI/IUGG	Union géodésique et géophysique internationale/International Union of Geodesy and Geophysics
UICPA/IUPAC	Union internationale de chimie pure et appliquée/International Union of Pure and Applied Chemistry
UIPPA/IUPAP	Union internationale de physique pure et appliquée/International Union of Pure and Applied Physics
UIT/ITU	Union internationale des radiocommunications/International Telecommunication Union
UME	Ulusal Metroloji Enstitüsü/National Metrology Institute, Marmara Research Centre, Gebze-Kocaeli (Turquie)

UN	Nations unies/United Nations
URSI	Union radioscopique internationale/International Union of Radio Science
VNIIM	Institut de métrologie D.I. Mendéléev/D.I. Mendeleev Institute for Metrology, Saint-Pétersbourg (Féd. de Russie)
VNIIMS	Russian Research Institute for Metrological Service of Gosstandart of Russia, Moscou (Féd. de Russie)
VNIIOFI	Institut des mesures en optique physique, Gosstandart, Moscou (Féd. de Russie)
VSL*	Van Swinden Laboratorium, Delft (Pays-Bas), <i>voir</i> NMI
WGDM	Groupe de travail du CCL sur la métrologie dimensionnelle/CCL Working Group on Dimensional Metrology
WHO*	<i>voir</i> OMS
WTO*	<i>voir</i> OMC

2 Sigles des termes scientifiques Acronyms for scientific terms

EIT-90/ITS-90	Échelle internationale de température de 1990/International Temperature Scale of 1990
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GUM	Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure/Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
IDMS	Spectrométrie de masse avec dilution isotopique/Isotope Dilution Mass Spectrometry
ITRF	Système de référence terrestre spécifié par le Service international de la rotation terrestre/Terrestrial Reference Frame maintained by the International Earth Rotation Service
ITS-90	<i>voir</i> EIT-90
KCDB	Base de données du BIPM sur les comparaisons clés/BIPM Key Comparison Database
LPTF-FO1	Fontaine à césium n° 1 du Laboratoire primaire du temps et des fréquences
NMR	Résonance magnétique nucléaire/Nuclear Magnetic Resonance
PHARAO	Projet d'horloge atomique à refroidissement d'atomes en orbite
QHE	Effet Hall quantique/Quantum Hall Effect
QHR	Résistance de Hall quantifiée/Quantum Hall Resistance
SET	Effet tunnel monoélectronique/Single Electron Tunnelling
SI	Système international d'unités/International System of Units
SIR	Système international de référence/International Reference System

SPRT	Thermomètre à résistance de platine étalon/Standard Platinum Resistance Thermometer
TAI	Temps atomique international/International Atomic Time
TDCR	Rapport des coïncidences triples aux coïncidences doubles/ Triple-to-double Coincidence Ratio Method
TWSTFT	Comparaison de temps et de fréquence par aller et retour sur satellite/Two-way Satellite Time and Frequency Transfer
UTC	Temps universel coordonné/Coordinated Universal Time
UV	Ultraviolet
VIM	Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie/International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology