

**Rapport du directeur sur l'activité et la gestion  
du Bureau international des poids et mesures**  
(1<sup>er</sup> octobre 1999 – 1<sup>er</sup> juillet 2000)

**Bureau international des poids et mesures**

**Rapport du directeur  
sur l'activité et la gestion  
du Bureau international  
des poids et mesures**

(1<sup>er</sup> octobre 1999 – 1<sup>er</sup> juillet 2000)

Note sur l'utilisation du texte anglais (*voir* page 111)

Afin de mieux faire connaître ses travaux, le Comité international des poids et mesures publie une version en anglais de ses rapports.

Le lecteur doit cependant noter que le rapport officiel est toujours celui qui est rédigé en français. C'est le texte français qui fait autorité si une référence est nécessaire ou s'il y a doute sur l'interprétation.

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

Imprimé par : Stedi, Paris  
ISSN 1606-3740  
ISBN 92-822-2178-4

## TABLE DES MATIÈRES

États membres de la Convention du Mètre et Associés à la Conférence générale **11**

Le BIPM et la Convention du Mètre **13**

Liste du personnel du Bureau international des poids et mesures **17**

### **Rapport du directeur sur l'activité et la gestion du Bureau international des poids et mesures (1<sup>er</sup> octobre 1999 – 1<sup>er</sup> juillet 2000) 19**

#### **1 Introduction 21**

1.1 Publications, conférences et voyages ne concernant pas directement une section particulière **26**

1.1.1 Publications extérieures **26**

1.1.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **26**

1.2 Activités en liaison avec des organisations extérieures **27**

#### **2 Longueurs 27**

##### **2.1 Lasers 27**

2.1.1 Laser à Nd:YAG doublé à  $\lambda \approx 532$  nm **27**

2.1.2 Lasers à He-Ne asservis sur l'iode à  $\lambda \approx 633$  nm en cuve interne **28**

2.1.3 Lasers à diode asservis sur le rubidium à  $\lambda \approx 778$  nm en utilisant les composantes hyperfines des transitions 5S-5D à deux photons **29**

2.1.4 Lasers à He-Ne asservis sur le méthane à  $\lambda \approx 3,39$   $\mu$ m en cuve interne et externe **29**

2.1.5 Cuves à iode **30**

##### **2.2 Mesures de longueur : nanométrie 30**

2.2.1 Diffractomètre interférométrique à laser : méthode des trois longueurs d'onde **30**

2.2.2 Interférométrie laser pour les mesures de déplacement **30**

##### **2.3 Gravimétrie 31**

##### **2.4 Publications, conférences et voyages : section des longueurs 31**

2.4.1 Publications extérieures **31**

- 2.4.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **32**
- 2.5 Activités liées au travail des Comités consultatifs **34**
- 2.6 Visiteurs de la section des longueurs **34**
- 2.7 Stagiaires et chercheurs invités **35**
- 3 Masse et grandeurs apparentées **36**
  - 3.1 Prototypes et étalons de 1 kg **36**
  - 3.2 Balance à suspensions flexibles **36**
  - 3.3 Objets pour la détermination de la poussée de l'air **37**
  - 3.4 Mesure de la masse volumique de l'air par réfractométrie **37**
  - 3.5 Objets en silicium **38**
  - 3.6 Mesure de la fraction molaire de la vapeur d'eau dans l'air **39**
  - 3.7 Balance hydrostatique **39**
  - 3.8 Balance de torsion pour la mesure de  $G$  **40**
  - 3.9 Propriétés magnétiques des étalons de masse **41**
  - 3.10 Publications, conférences et voyages : section des masses **41**
    - 3.10.1 Publications extérieures **41**
    - 3.10.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **41**
  - 3.11 Activités liées au travail des Comités consultatifs **42**
  - 3.12 Visiteurs de la section des masses **42**
  - 3.13 Chercheurs invités **42**
- 4 Temps **43**
  - 4.1 Temps atomique international (TAI) et Temps universel coordonné (UTC) **43**
  - 4.2 Algorithmes pour les échelles de temps **43**
    - 4.2.1 Stabilité de l'EAL **43**
    - 4.2.2 Exactitude du TAI **44**
  - 4.3 Liaisons horaires **44**
    - 4.3.1 Mesures utilisant le code du Global Positioning System (GPS) et du Global Navigation Satellite System (GLONASS) **44**
    - 4.3.2 Mesures de phase **46**
    - 4.3.3 Comparaisons horaires par aller et retour **47**
  - 4.4 Pulsars **47**
  - 4.5 Références spatio-temporelles **47**
  - 4.6 Autres études **48**

- 4.7 Publications, conférences et voyages : section du temps **49**
    - 4.7.1 Publications extérieures **49**
    - 4.7.2 Publications du BIPM **50**
    - 4.7.3 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **50**
  - 4.8 Activités en liaison avec des organisations extérieures **52**
  - 4.9 Activités liées au travail des Comités consultatifs **53**
  - 4.10 Visiteurs de la section du temps **53**
- 5 Électricité **53**
- 5.1 Potentiel électrique : effet Josephson **53**
    - 5.1.1 Mesures de réseaux de jonctions de Josephson **53**
    - 5.1.2 Projet 429 de l'EUROMET : comparaison d'étalons de tension de 10 V **54**
  - 5.2 Résistance électrique et impédance **54**
    - 5.2.1 Projet 487 de l'EUROMET : utilisation d'une résistance de 100  $\Omega$  thermorégulée et stabilisée en pression comme étalon de transfert **54**
    - 5.2.2 Mesures d'étalons de résistance à effet Hall quantique à des fréquences de l'ordre du kilohertz **54**
    - 5.2.3 Conservation d'un étalon de référence de capacité et étalonnages de capacités **56**
  - 5.3 Détermination du bruit et de la stabilité des étalons de tension et des nanovoltmètres **56**
    - 5.3.1 Nouvel équipement pour la détermination des coefficients de température et de pression des étalons de tension à diode de Zener **57**
    - 5.3.2 Détermination du bruit et de la stabilité des étalons de tension à diode de Zener et des nanovoltmètres **57**
  - 5.4 Contrôle de la température ambiante, de la pression, et de l'humidité relative **58**
  - 5.5 Comparaisons bilatérales d'étalons électriques au BIPM **59**
  - 5.6 Étalonnages **59**
  - 5.7 Publications, conférences et voyages : section d'électricité **60**
    - 5.7.1 Publications extérieures **60**
    - 5.7.2 Rapports BIPM **60**
    - 5.7.3 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **61**
  - 5.8 Activités en liaison avec des organisations extérieures **62**
  - 5.9 Activités liées au travail des Comités consultatifs **62**

- 5.10 Visiteurs de la section d'électricité **62**
- 5.11 Chercheurs invités **63**
- 6 Radiométrie, photométrie, thermométrie et manométrie **63**
  - 6.1 Radiométrie **63**
  - 6.2 Photométrie **64**
  - 6.3 Manométrie **65**
  - 6.4 Thermométrie **65**
  - 6.5 Travaux d'étalonnage **65**
  - 6.6 Informatique **65**
  - 6.7 Publications, conférences et voyages : section de radiométrie, photométrie, thermométrie et manométrie **66**
    - 6.7.1 Publications extérieures **66**
    - 6.7.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **66**
  - 6.8 Activités liées au travail des Comités consultatifs **68**
  - 6.9 Activités en liaison avec les organisations internationales **68**
  - 6.10 Visiteurs de la section de radiométrie, photométrie, thermométrie et manométrie **68**
  - 6.11 Étudiants **68**
- 7 Rayonnements ionisants **69**
  - 7.1 Rayons x et  $\gamma$  **69**
    - 7.1.1 Facteurs de correction pour les chambres étalons à paroi d'air **69**
    - 7.1.2 Étalons et équipements pour la dosimétrie **69**
    - 7.1.3 Comparaisons de dosimétrie **70**
    - 7.1.4 Étalonnages pour la dosimétrie **71**
  - 7.2 Radionucléides **71**
    - 7.2.1 Comparaison de mesures d'activité d'une solution de  $^{204}\text{Tl}$  **71**
    - 7.2.2 Comparaison de mesures d'activité d'une solution de  $^{152}\text{Eu}$  **72**
    - 7.2.3 Comparaison de mesures d'activité d'une solution de  $^{89}\text{Sr}$  **72**
    - 7.2.4 Comparaison de mesures d'activité d'une solution de  $^{238}\text{Pu}$  **73**
    - 7.2.5 Système international de référence pour la mesure d'activité d'émetteurs de rayonnement gamma (SIR) **73**

- 7.2.6 Courbe d'efficacité du SIR **74**
- 7.2.7 Spectrométrie de rayonnement gamma **75**
- 7.3 Publications, conférences et voyages : section des rayonnements ionisants **75**
  - 7.3.1 Publications extérieures **75**
  - 7.3.2 Rapports BIPM **76**
  - 7.3.3 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **76**
- 7.4 Activités en liaison avec des organisations extérieures **78**
- 7.5 Activités liées au travail des Comités consultatifs **78**
- 7.6 Visiteurs de la section des rayonnements ionisants **78**
- 8 La base de données du BIPM sur les comparaisons clés **79**
  - 8.1 Activités liées à la base de données du BIPM sur les comparaisons clés **79**
  - 8.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **84**
  - 8.3 Activités liées au travail des Comités consultatifs **84**
  - 8.4 Visiteurs **84**
- 9 Publications du BIPM **85**
  - 9.1 Rapports du CIPM et des Comités consultatifs **85**
  - 9.2 Metrologia **85**
  - 9.3 Serveur Internet du BIPM **85**
- 10 Réunions et exposés au BIPM **86**
  - 10.1 Réunions **86**
  - 10.2 Exposés **86**
- 11 Certificats et notes d'étude **87**
  - 11.1 Certificats **87**
  - 11.2 Notes d'étude **92**
- 12 Gestion du BIPM **93**
  - 12.1 Comptes **93**
    - 12.1.1 Compte I : fonds ordinaires **93**
    - 12.1.2 Compte II : caisse de retraite **95**
    - 12.1.3 Compte III : fonds spécial pour l'amélioration du matériel scientifique **95**
    - 12.1.4 Compte IV : caisse de prêts sociaux **96**

- 12.1.5 Compte V : réserve pour les bâtiments **96**
- 12.1.6 Compte VI : Metrologia **97**
- 12.1.7 Compte VII : fonds de réserve pour l'assurance maladie **97**
- 12.1.8 Bilan au 31 décembre 1999 **98**
- 12.2 Personnel **99**
  - 12.2.1 Engagements (R. Wielgosz, G. Petitgand) **99**
  - 12.2.2 Promotions et changement de grade (R. Felder, J. Hostache) **99**
  - 12.2.3 Chercheurs associés (L. Ma, Z. Jiang) **99**
  - 12.2.5 Départ (D. Bournaud) **99**
- 12.3 Bâtiments **100**
  - 12.3.1 Petit Pavillon **100**
  - 12.3.2 Grand Pavillon **100**
  - 12.3.3 Observatoire **100**
  - 12.3.4 Bâtiment des rayonnements ionisants **100**
  - 12.3.5 Pavillon du Mail **100**
  - 12.3.6 Autres bâtiments **100**
  - 12.3.7 Extérieurs et parc **101**

**Liste des sigles utilisés dans le présent volume 102**

**ÉTATS MEMBRES DE LA CONVENTION DU MÈTRE  
ET ASSOCIÉS À LA CONFÉRENCE GÉNÉRALE**  
au 8 avril 2000

**États membres de la Convention du Mètre**

Afrique du Sud	Iran (Rép. islamique d')
Allemagne	Irlande
Argentine	Israël
Australie	Italie
Autriche	Japon
Belgique	Mexique
Brésil	Norvège
Bulgarie	Nouvelle-Zélande
Cameroun	Pakistan
Canada	Pays-Bas
Chili	Pologne
Chine	Portugal
Corée (Rép. de)	Roumanie
Corée (Rép. pop. dém. de)	Royaume-Uni
Danemark	Russie (Féd. de)
Dominicaine (Rép.)	Singapour
Égypte	Slovaquie
Espagne	Suède
États-Unis	Suisse
Finlande	Tchèque (Rép.)
France	Thaïlande
Hongrie	Turquie
Inde	Uruguay
Indonésie	Venezuela

**Associés à la Conférence générale**

Hong Kong, Chine



## **LE BIPM ET LA CONVENTION DU MÈTRE**

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

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

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

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

Le Bureau international fonctionne sous la surveillance exclusive du Comité international des poids et mesures (CIPM), placé lui-même sous l'autorité de la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) à laquelle il présente son rapport sur les travaux accomplis par le Bureau international.

La Conférence générale rassemble des délégués de tous les États membres de la Convention du Mètre et se réunit actuellement tous les quatre ans dans le but :

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

Le Comité international comprend dix-huit membres appartenant à des États différents ; il se réunit actuellement tous les ans. Le bureau de ce Comité adresse aux Gouvernements des États membres de la Convention du Mètre un rapport annuel sur la situation administrative et financière du Bureau international. La principale mission du Comité international est d'assurer l'unification mondiale des unités de mesure, en agissant directement, ou en soumettant des propositions à la Conférence générale.

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

Environ quarante-cinq physiciens et techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau international. Ils y font principalement des recherches métrologiques, des comparaisons internationales des réalisations des unités et des vérifications d'étalons. Ces travaux font l'objet d'un rapport annuel détaillé qui est publié avec les *Procès-verbaux des séances du Comité international*.

Devant l'extension des tâches confiées au Bureau international en 1927, le Comité international a institué, sous le nom de Comités consultatifs, des organes destinés à le renseigner sur les questions qu'il soumet, pour avis, à leur examen. Ces Comités consultatifs, qui peuvent créer des groupes de travail temporaires ou permanents pour l'étude de sujets particuliers, sont chargés de coordonner les travaux internationaux effectués dans leurs domaines respectifs et de proposer au Comité international des recommandations concernant les unités.

Les Comités consultatifs ont un règlement commun (*BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1963, **31**, 97). Ils tiennent leurs sessions à des intervalles irréguliers. Le président de chaque Comité consultatif est désigné par le Comité international ; il est généralement membre du Comité international. Les Comités consultatifs ont pour membres des laboratoires de métrologie et des instituts spécialisés, dont la liste est établie par le Comité international, qui envoient des délégués de leur choix. Ils comprennent aussi des membres nominativement désignés par le Comité international, et un

représentant du Bureau international (Critères pour être membre des Comités consultatifs, *BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1996, **64**, 6). Ces Comités sont actuellement au nombre de dix :

1. Le Comité consultatif d'électricité et magnétisme (CCEM), nouveau nom donné en 1997 au Comité consultatif d'électricité (CCE) créé en 1927 ;
2. Le Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR), nouveau nom donné en 1971 au Comité consultatif de photométrie (CCP) créé en 1933 (de 1930 à 1933 le CCE s'est occupé des questions de photométrie) ;
3. Le Comité consultatif de thermométrie (CCT), créé en 1937 ;
4. Le Comité consultatif des longueurs (CCL), nouveau nom donné en 1997 au Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM) créé en 1952 ;
5. Le Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF), nouveau nom donné en 1997 au Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS) créé en 1956 ;
6. Le Comité consultatif des rayonnements ionisants (CCRI), nouveau nom donné en 1997 au Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants (CCEMRI) créé en 1958 (en 1969, ce Comité consultatif a institué quatre sections : Section I (Rayons x et  $\gamma$ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie  $\alpha$ ) ; cette dernière section a été dissoute en 1975, son domaine d'activité étant confié à la Section II) ;
7. Le Comité consultatif des unités (CCU), créé en 1964 (ce Comité consultatif a remplacé la « Commission du système d'unités » instituée par le Comité international en 1954) ;
8. Le Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM), créé en 1980 ;
9. Le Comité consultatif pour la quantité de matière (CCQM), créé en 1993 ;
10. Le Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations (CCAUV), créé en 1999.

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

- *Comptes rendus des séances de la Conférence générale des poids et mesures* ;
- *Procès-verbaux des séances du Comité international des poids et mesures* ;
- *Rapports des sessions des Comités consultatifs*.

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

La collection des *Travaux et mémoires du Bureau international des poids et mesures* (22 tomes publiés de 1881 à 1966) a été arrêtée par décision du Comité international, de même que le *Recueil de travaux du Bureau international des poids et mesures* (11 volumes publiés de 1966 à 1988).

Les travaux du Bureau international font l'objet de publications dans des journaux scientifiques ; une liste en est donnée chaque année dans les *Procès-verbaux des séances du Comité international*.

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

**LISTE DU PERSONNEL DU  
BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES**  
au 1<sup>er</sup> juillet 2000

**Directeur** : M. T.J. Quinn

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

M. R. Felder, Mme S. Picard, M. L. Robertsson, M. L. Ma\*  
Mme A. Chartier, M. J. Labot

**Masse** : M. R.S. Davis

Mlle H. Fang\*, Mme C. Goyon-Taillade, M. A. Picard, M. L.F. Vitouchkine  
Mme J. Coarasa, M. J. Hostache

**Temps** : Mme E.F. Arias

MM. J. Azoubib, Z. Jiang\*, W. Lewandowski, G. Petit, P. Wolf  
Mlle H. Konaté, M. P. Moussay, Mme M. Thomas

**Électricité** : M. T.J. Witt

MM. F. Delahaye, D. Reymann, A. Zarka  
MM. D. Avrons, R. Chayramy, A. Jaouen

**Radiométrie et photométrie** : M. R. Köhler

MM. R. Goebel, M. Stock  
MM. L. Le Mée, R. Pello, G. Petitgand

**Rayonnements ionisants** : Mme P. Allisy-Roberts

M. D.T. Burns, Mme C. Michotte, M. G. Ratel  
MM. C. Colas, M. Nonis, P. Roger, C. Veyradier

**Chimie** : M. R. Wielgosz

**Publications** : M. P.W. Martin

Mlle J.R. Miles

**Base de données du BIPM sur les comparaisons clés** : Mme C. Thomas\*\*

**Secrétariat** : Mme F. Joly

Mmes L. Delfour, D. Le Coz\*\*, G. Négadi

**Finances, administration** : Mme B. Perent

Mmes D. Spelzini Etter, M.-J. Martin, D. Saillard\*\*

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

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

*Jardiniers* : MM. C. Dias-Nunes, A. Zongo\*\*\*

**Atelier de mécanique** : M. J. Sanjaime

MM. P. Benoit, F. Boyer, M. de Carvalho, J.-B. Caucheteux, J.-P. Dewa,  
P. Lemartrier, D. Rotrou,

MM. E. Dominguez\*\*\*\*, C. Neves\*\*\*\*

**Directeur honoraire** : M. P. Giacomo

**Métrologiste principal honoraire** : M. G. Leclerc

---

\* Chercheur associé(e).

\*\* Également aux publications.

\*\*\* Également à l'atelier.

\*\*\*\* Également gardien.

**Rapport du directeur  
sur l'activité et la gestion  
du Bureau international  
des poids et mesures**

(1<sup>er</sup> octobre 1999 – 1<sup>er</sup> juillet 2000)





## 1 INTRODUCTION

Le rapport du directeur de cette année comporte deux innovations dans sa présentation. La première d'entre elles concerne le texte du rapport. Dans le passé, le texte du rapport du directeur daté du 1<sup>er</sup> juillet qui était envoyé aux membres du Comité international était considéré comme provisoire, et était mis à jour en octobre après la réunion du Comité international. Ce ne sera plus le cas. À dater de cette année, le rapport du 1<sup>er</sup> juillet sera considéré comme définitif et rendra compte des travaux accomplis depuis le 1<sup>er</sup> octobre 1999 et des travaux en cours dans les laboratoires du BIPM à la date du 1<sup>er</sup> juillet 2000. La seconde innovation est que le rapport du directeur ne donne plus les résultats des comparaisons internationales. Chaque comparaison est mentionnée et il est fait référence aux publications (rapports BIPM et publications extérieures) qui en donnent tous les détails et résultats. Les résultats figureront aussi dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés dès qu'ils seront approuvés. Il est ainsi clair que, dorénavant, les résultats officiels des comparaisons du BIPM sont ceux qui figurent dans cette base de données.

J'ai aussi essayé d'abrégé le texte. Tous les travaux scientifiques importants effectués au BIPM sont publiés dans des publications extérieures, soit dans des journaux à comité de lecture, soit dans des comptes rendus de congrès. Ce rapport a pour but de résumer brièvement les travaux du BIPM, et donne la liste complète des références aux publications contenant les informations complètes. Il fait non seulement référence aux articles publiés, mais aussi aux articles soumis pour publication et qui ont été acceptés mais qui ne sont pas encore parus. Les auteurs fourniront des copies des articles soumis pour publication sur demande et la référence du texte publié paraîtra dans le rapport de l'année suivante. Les articles soumis pour publication qui n'ont pas encore été acceptés ne sont pas mentionnés.

Le rapport comprend une description assez détaillée de la base de données du BIPM sur les comparaisons clés. Il décrit le travail qui a abouti à son ouverture, le 30 novembre 1999, de cette base sur le site Internet du BIPM et à l'entrée des premiers résultats des comparaisons clés qui ont passé avec succès toutes les étapes du processus décrit dans l'arrangement de reconnaissance mutuelle. Nous sommes très conscients, au BIPM, de l'énorme quantité de travail que représentent les comparaisons clés pour les laboratoires nationaux de métrologie et, en particulier, la préparation de la documentation relative aux aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages

pour l'annexe C de l'arrangement. Nous faisons tout notre possible pour nous assurer que le travail qui incombe au BIPM est effectué avec une efficacité maximale et pour aider de notre mieux nos collègues des laboratoires nationaux de métrologie. En ce qui concerne la base de données du BIPM sur les comparaisons clés, les progrès considérables qui ont été faits n'auraient pas été possibles sans l'étroite collaboration qui a existé entre le BIPM et le NIST et dont nous sommes très reconnaissants.

Le 10 novembre 1999, Mme Elisa Felicitas Arias a pris en charge le poste de responsable de la section du temps et le 1<sup>er</sup> mai 2000, M. Robert Wielgosz a pris en charge le nouveau poste de responsable de la section de chimie. Les autres recrutements, les départs et les promotions sont mentionnés comme d'habitude à la fin du rapport.

Le texte qui suit est un résumé des travaux scientifiques de chaque section.

**Longueurs :** Les comparaisons internationales concernent principalement les lasers fonctionnant à la longueur d'onde recommandée  $\lambda \approx 633$  nm. Les lasers du BIPM à  $\lambda \approx 633$  nm ont participé à des comparaisons avec les laboratoires nationaux suivants : NIST-JILA, NRC, PTB, VNIIFTRI et VNIIM. Une première comparaison avec le BNM-INM (France), l'IMGC (Italie) et la PTB (Allemagne) a été effectuée au BIPM avec les lasers à Nd:YAG à fréquence doublée fonctionnant à la longueur d'onde recommandée de  $\lambda \approx 532$  nm. La stabilité de la fréquence des deux lasers à Nd:YAG du BIPM a été récemment considérablement améliorée : exprimée au moyen de l'écart-type d'Allan relatif, elle est de  $5 \times 10^{-15}$  pour un temps d'échantillonnage de 500 s. Ce résultat est proche de la meilleure valeur jamais obtenue, celle du JILA.

Nous avons bien progressé dans la construction de tubes de lasers à He-Ne « BIPM » à la longueur d'onde de  $\lambda \approx 3,39$   $\mu\text{m}$ . Notre collaboration avec l'Institut de physique des lasers (Saint-Pétersbourg), en vue de la fabrication d'un laser à Nd:YAG bon marché et facile à utiliser pour les mesures de longueur, semble prometteuse ; plusieurs laboratoires nationaux s'y intéressent déjà.

**Masses :** Une nouvelle balance de portée 1 kg destinée aux étalonnages a été mise au point et fait l'objet d'études intensives. Nous pensons que sa reproductibilité peut encore être améliorée et nous poursuivons nos efforts en ce sens. Notre programme de travail, visant à réduire les problèmes liés aux corrections pour la poussée de l'air, a bien avancé et nous pouvons maintenant contrôler les variations de la masse volumique de l'air à l'aide d'un nouveau réfractomètre. Cette méthode s'ajoute à la méthode traditionnelle fondée sur une équation d'état prenant en compte la température, la pression, la température du point de rosée et la teneur en

dioxyde de carbone. Une troisième méthode, mesurant la différence de masse d'objets conçus spécialement pour la mesure de la poussée de l'air, s'y ajoutera prochainement. Les mesures de la constante gravitationnelle newtonienne,  $G$ , se poursuivent. Nous avons atteint une précision satisfaisante avec notre appareillage le plus récent mais nous devons encore résoudre le problème de l'étalonnage exact de notre transducteur à asservissement électrostatique.

**Temps** : En ce qui concerne la section du temps, la stabilité à moyen terme du Temps atomique international, TAI, exprimée au moyen de l'écart-type d'Allan, est d'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 CS1, CS2 et CS3 de la PTB, fonctionnant en continu, et les trois étalons à pompage optique CRL-01, NIST-7 et NRLM-4. En raison de l'augmentation du nombre des étalons primaires et de l'amélioration de leur stabilité, l'unité d'échelle du TAI correspond, selon nos estimations, à la seconde du SI à  $4 \times 10^{-15}$  près depuis octobre 1999. 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 le GPS et le GLONASS. Un intérêt tout particulier a été porté aux techniques de réception simultanée des signaux de plusieurs de ces systèmes en mode multi-canal et à l'utilisation des mesures de phase de la porteuse des signaux du GPS. En plus de la méthode « classique » des observations simultanées réalisées avec des récepteurs du GPS à un seul canal utilisant le code C/A, nous utilisons aussi pour le calcul du TAI les données de récepteurs du GPS à canaux multiples pour trois liaisons, et quatre comparaisons d'horloges sont réalisées par aller et retour. Nos activités de recherche sont aussi consacrées aux systèmes de référence spatio-temporels, et en particulier à la définition et à la réalisation de temps-coordonnée dans le cadre relativiste. La section du temps du BIPM s'est portée candidate pour participer avec l'USNO à l'établissement de conventions pour les systèmes de référence spatio-temporels dans le cadre du Service international de la rotation terrestre. Les autres activités de recherche concernent les pulsars, les projets d'utilisation d'horloges dans l'espace et l'interférométrie atomique.

**Électricité** : Les travaux d'étalonnage effectués dans la section d'électricité cette année reflètent l'intérêt porté par les laboratoires nationaux de métrologie aux mesures de capacité. Quatorze étalons de capacité ont été étalonnés pour cinq laboratoires nationaux de métrologie. Les résultats de ces étalonnages sont exprimés en fonction de notre réalisation de  $R_{K-90}$  avec une

incertitude-type de  $5 \times 10^{-8}$  en valeur relative. Les activités liées aux comparaisons d'étalons de tension restent à un niveau constant : elles concernent trois nouvelles comparaisons bilatérales et la quatrième et dernière étape de la comparaison de 10 V de l'EUROMET à laquelle le BIPM participe. Nous avons réalisé cette année une avancée importante dans la mesure de la résistance de Hall quantifiée en courant alternatif à des fréquences de l'ordre du kilohertz : la dépendance linéaire en fonction de la fréquence a été réduite de quelques  $10^{-7}$  à  $\pm 2 \times 10^{-8}$  par kilohertz. Ce travail permet d'établir une méthode pour utiliser l'effet Hall quantique comme étalon d'impédance quantique indépendant. Une fois de plus, M. B.P. Kibble, qui a passé deux mois avec nous cette année comme chercheur invité, a efficacement participé à ces travaux. Nos études sur le bruit en  $1/f$  des étalons de tension à diode de Zener ont été réalisées avec quinze instruments différents. Tous ces instruments ont un bruit en  $1/f$  qui limite l'écart-type d'Allan des tensions de sortie à 10 V à une valeur caractéristique de chaque instrument, mais qui reste dans un domaine situé entre 20 nV et 80 nV, même si l'on effectue un grand nombre de mesures. Il s'agit là de la limite intrinsèque de ce type d'étalon de tension. Nous avons aussi utilisé les méthodes d'analyse spectrale et de variance d'Allan pour caractériser le bruit et la stabilité d'un certain nombre de nanovoltmètres. Dans un environnement ordinaire de laboratoire, la variance d'Allan est généralement limitée par les variations de la température ambiante. Dans un environnement où la température est constante, la limite ultime est le bruit en  $1/f$ . Les résultats peuvent être utilisés pour évaluer la performance des instruments et pour optimiser les méthodes de mesures de routine.

**Radiométrie, photométrie :** Les travaux ont débuté pour réaliser un étalon d'éclairement énergétique spectral dans le proche infrarouge utilisant un caloduc à corps noir à sodium à haute température. La caractérisation du corps noir est en cours et sa température a été stabilisée. Les premières mesures de température par radiométrie ont été réalisées avec succès au moyen de trois radiomètres à filtre étalonnés, ceci afin de tester la méthode. Les récepteurs pour la comparaison clé de sensibilité spectrale du CCPR dans le domaine du visible ont été montés, caractérisés et étalonnés. Ils seront envoyés au premier groupe de participants au cours du second semestre de cette année. Après l'achèvement de la comparaison supplémentaire de radiomètres cryogéniques CCPR-S3, un des participants a demandé à effectuer une comparaison bilatérale avec le BIPM. Celle-ci est en cours. Une vérification des aptitudes de mesure des aires d'ouverture a été effectuée au

BIPM et à la PTB. Des comparaisons bilatérales de lampes de flux lumineux et d'intensité lumineuse ont aussi été effectuées avec la PTB.

**Rayonnements ionisants :** Le vaste programme de renouvellement des équipements et de mise à niveau des laboratoires se poursuit, y compris l'installation de nouveaux systèmes de conditionnement d'air. Par conséquent, dans le domaine de la dosimétrie photonique, une seule comparaison a été effectuée au BIPM au cours des sept derniers mois, alors que huit devaient avoir lieu avant la fin de l'an 2000. Toutefois, huit laboratoires nationaux de métrologie participent à une comparaison de dosimétrie du CCRI organisée et mise en œuvre par la section. De plus, seize étalonnages ont été effectués pour des laboratoires secondaires de dosimétrie. Les calculs de Monte Carlo pour évaluer les facteurs de correction pour la perte d'électrons et la diffusion des photons dans les chambres à paroi d'air s'avèrent très utiles aux laboratoires nationaux de métrologie, et conduisent à un meilleur accord entre les résultats de la comparaison. Une source supplémentaire de  $^{60}\text{Co}$  a été commandée avec la nouvelle tête d'irradiation nécessaire pour obtenir l'accord des autorités françaises pour son transport ; elle devrait être installée vers la fin de l'année 2000. Dans le domaine des radionucléides, un groupe de travail œuvre à l'amélioration des comparaisons à venir de radionucléides dont le rayonnement est analogue à celui du  $^{204}\text{Tl}$ , les résultats de la comparaison de ce radionucléide n'étant pas acceptables. La comparaison préliminaire de mesures d'activité du  $^{152}\text{Eu}$  a été suivie d'une comparaison internationale entre vingt-quatre laboratoires nationaux de métrologie, et nous attendons les résultats définitifs. Une nouvelle comparaison de mesures d'activité du  $^{89}\text{Sr}$  a commencé par l'envoi de solutions radioactives à vingt-deux participants et une comparaison de  $^{238}\text{Pu}$  est programmée pour cet automne. Le volume des données soumises au Système international de référence (SIR) a augmenté de 9 % cette année et la monographie qui décrira la procédure de comparaison et tous les résultats obtenus dans le passé devrait être prête d'ici la fin de l'année 2000. Il sera ainsi possible d'évaluer les degrés d'équivalence entre les étalons nationaux afin de les soumettre pour publication dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés. Le spectromètre à rayonnement gamma du BIPM s'avère très utile pour déterminer la contamination des échantillons soumis au SIR et nous travaillons à le remplacer par un système au germanium hyperpur. D'autres études sont poursuivies sur des méthodes de mesure absolue d'activité.

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

### 1.1.1 Publications extérieures

1. Quinn T.J., Capacitance reaches a new standard, *Physics World*, novembre 1999, 22-23.
2. Quinn T.J., International Report: News from the BIPM, *Metrologia*, 2000, **37**, 87-98.
3. Quinn T.J., Fröhlich C., Accurate radiometers should measure the output of the Sun, *Nature*, 1999, **401**, 841.

### 1.1.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

T.J. Quinn s'est rendu à :

- Louxor (Égypte), les 3 et 4 octobre 1999, pour une réunion de MENAMET.
- Madrid (Espagne), du 24 au 28 octobre 1999, pour NEWRAD'99.
- Taipei (Chine), du 14 au 20 novembre 1999, pour une réunion de l'APMP.
- Gaithersburg (Maryland, États-Unis), du 16 au 21 janvier 2000, pour assister à un groupe de travail du CCT ; du 18 au 21 mars 2000, pour la 4<sup>e</sup> réunion du Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM.
- Turin (Italie), le 3 février 2000, pour une réunion du conseil scientifique de l'IMGC.
- Oxford (Royaume-Uni), le 7 février 2000, pour rencontrer M. K. Burnett et visiter le laboratoire Clarendon.
- Londres (Royaume-Uni), le 16 février et le 29 juin 2000, pour des réunions du Paul Instrument Fund Committee.
- Boston (États-Unis), les 22 et 23 mars 2000, pour rencontrer M. S. Richman et rendre visite au groupe de recherche sur le projet LIGO.
- Ottawa (Canada), le 24 mars 2000, pour une réunion du conseil de l'INMS du NRC.
- Singapour (Rép. de Singapour), le 11 mai 2000, pour un exposé à l'occasion de la Journée mondiale de la métrologie et de la célébration du 25<sup>e</sup> anniversaire du PSB Metrology Programme, et pour une réunion des Chief Executives of Singapore Industries.

- Sydney (Australie), du 13 au 19 mai 2000, pour assister à la CPEM et faire un exposé sur  $G$  et sur le 125<sup>e</sup> anniversaire de la Convention du Mètre ; le 20 mai 2000, pour une réunion du bureau du CIPM.
- Istanbul (Turquie), du 14 au 16 juin 2000, pour assister à une réunion de l'EUROMET.
- l'IPQ, Lisbonne (Portugal), le 20 juin 2000, pour un exposé sur l'arrangement de reconnaissance mutuelle au « First national congress for quality ».
- Teddington (Royaume-Uni), le 21 juin 2000, pour la publication de l'ouvrage sur le centenaire du NPL.

## 1.2 Activités en liaison avec des organisations extérieures

M. Quinn assiste régulièrement aux réunions du Conseil scientifique de l'IMGC. Il est vice-président de la Commission SUN-AMCO de l'UIPPA, membre du conseil de l'INMS du NRC, membre du CODATA Task Group on Fundamental Constants, et membre de l'Interdivisional Committee on Nomenclature and Symbols de l'UICPA. Il représente la Royal Society au Paul Instrument Fund. Il préside le Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM et le Comité commun pour les guides en métrologie.

## 2 LONGUEURS (J.-M. CHARTIER)

### 2.1 Lasers

#### 2.1.1 Laser à Nd:YAG doublé à $\lambda \approx 532$ nm (L.S. Ma\*, S. Picard et L. Robertsson ; J. Labot)

Le laser à Nd:YAG à fréquence doublée présente plusieurs avantages techniques par rapport à d'autres étalons et l'on peut s'attendre à ce qu'il joue un rôle de plus en plus important dans la métrologie des lasers. De plus, en raison de sa stabilité élevée et du fait qu'il fournit simultanément un rayonnement optique à sa fréquence fondamentale et à la fréquence doublée,

---

\* Chercheur associé depuis le 24 janvier 2000.

donc un intervalle d'un octave optique, il est bien adapté pour être utilisé avec les générateurs de « peignes » de fréquence, récemment mis au point et fondés sur les lasers femto-seconde. Cet assemblage peut fournir une radiation utile pour comparer des étalons dans tout le domaine du visible, par référence soit aux transitions de l'iode aux alentours de 532 nm, qui ont une meilleure stabilité à court terme, soit directement à un étalon à césium pour une exactitude supérieure et une meilleure stabilité à long terme.

La mise au point d'étalons à 532 nm au BIPM a permis d'organiser les premières comparaisons. En février 1999, nous avons comparé au BIPM la fréquence des lasers du BNM-INM, de l'IMGC, de la PTB et du BIPM. Ce groupe de lasers reproduit la même fréquence à  $1 \times 10^{-11}$  près. Ce résultat est particulièrement encourageant puisqu'ils utilisent trois techniques de modulation différentes (technique de la troisième harmonique, modulation de fréquence en bande latérale et transfert de modulation), avec des fréquences de modulation individuelles des lasers étalonnées de 5555 Hz à 10 MHz. On peut espérer qu'avec de l'expérience, il sera possible d'améliorer la reproductibilité de ce type de laser.

À la suite de cette comparaison, les deux lasers du BIPM nommés A et B ont été comparés entre eux. La différence de fréquence relative reste dans une limite de  $2 \times 10^{-12}$  pour une période de quatre semaines. L'écart-type d'Allan relatif témoigne d'une stabilité à court terme de  $5 \times 10^{-14}$  pour une durée d'intégration de 1 s, qui décroît jusqu'à un palier de  $6 \times 10^{-15}$  pour une durée d'intégration de 500 s, une valeur proche de celle obtenue au JILA.

### 2.1.2 Lasers à He-Ne asservis sur l'iode à $\lambda \approx 633$ nm en cuve interne (J.-M. Chartier ; A. Chartier et J. Labot)

Le laser BIPMP1 a été modifié pour fonctionner avec les techniques de troisième et cinquième harmonique. Actuellement, il fonctionne seulement avec la troisième harmonique mais il est équipé d'un nouveau tube de gain qui doit être vérifié. Les deux lasers portables du BIPM actuellement utilisés pour les comparaisons internationales en dehors du BIPM sont les lasers BIPMP3 et BIW167, ce dernier étant un laser Winters Electro Optics acheté en 1998. Suite au remplacement du tube de gain du laser BIPMP3 avant la comparaison au NRC, une différence de fréquence d'environ 4 kHz a été constatée lorsqu'on le compare au laser de référence BIPM4 et au laser BIW167.

Depuis le précédent rapport, les comparaisons suivantes ont été effectuées :

- du 6 au 17 décembre 1999, au BIPM, entre le VNIIM, le VNIIFTRI et le BIPM ;
- du 31 janvier au 4 février 2000, au BIPM, entre la PTB et le BIPM ;
- du 10 au 14 avril 2000, au NRC (Canada), entre le NRC, le NIST-JILA et le BIPM ; pendant cette période, les fréquences absolues des lasers BIPMP3 et INMS-3 (NRC) ont été déterminées à l'aide de la chaîne de fréquence du NRC.

Les résultats de ces comparaisons seront publiés, le moment venu, et ils figureront dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés.

Enfin, un laser Thomson-Jaeger-BIPM appartenant à l'IGM (Belgique) a été aligné et la stabilité de sa fréquence a été vérifiée.

#### 2.1.3 Lasers à diode asservis sur le rubidium à $\lambda \approx 778$ nm en utilisant les composantes hyperfines des transitions 5S-5D à deux photons (R. Felder)

La construction de nos lasers à diode portables asservis sur le rubidium progresse. Nous avons commandé et reçu notre premier système à asservissement électronique et un troisième collecteur de lumière pour la détection du signal de fluorescence. La cuve à rubidium rapportée du JILA (Boulder, États-Unis) en 1998 a été installée dans une cavité Perot-Fabry conçue et construite au BIPM. Un système à ultravide à pompe ionique a été mis au point pour servir au remplissage des cuves à rubidium. À cette occasion, nous désirons remercier MM. Flory et Trehin (ENS, Paris, France) pour leurs conseils dans ce domaine.

#### 2.1.4 Lasers à He-Ne asservis sur le méthane à $\lambda \approx 3,39$ $\mu\text{m}$ en cuve interne et externe (R. Felder et D. Rotrou)

La construction et l'étude de tubes laser à He-Ne et de cuves à méthane se poursuit. Malgré quelques problèmes techniques qui ont retardé la livraison et l'utilisation de nouveaux supports de fenêtres, nous avons obtenu des résultats satisfaisants dans la mise au point de nouveaux prototypes conçus pour des systèmes lasers fondés sur la technique « deux modes ».

Le laser BIDM1, que nous avons acheté en 1998 à l'Institut Lebedev (Moscou, Féd. de Russie), a été démonté et les tubes à He-Ne défectueux ont été ouverts, modifiés et réemplis. Nous avons maintenant reconstruit ce laser. Les tubes laser de rechange que nous avons achetés pour ce système ont été

soumis au même traitement. Bien que ce travail ait demandé d'y consacrer beaucoup de temps, il était indispensable à la conservation de notre laser de référence et à notre participation à venir aux travaux de collaboration internationale. Nous avons commencé à collaborer avec nos collègues de l'Institut Lebedev à la mise au point d'un système transportable qui résout le doublet de recul de la composante centrale [transition (7-6)] du triplet de la structure hyperfine. La pompe turbo-moléculaire de notre deuxième système à ultravide a été remplacée, une opération qui a demandé de reconcevoir entièrement le système.

#### 2.1.5 Cuves à iode (J.-M. Chartier et S. Picard ; A. Chartier et J. Labot)

Ayant observé une dégradation de la qualité des cuves, qui entraîne des décalages de fréquence de 5 kHz à 10 kHz, nous avons nettoyé le système à vide en contact avec l'iode et effectué une nouvelle distillation de la réserve d'iode. Après cela nous avons ouvert, nettoyé et réempli environ dix cuves, portant à vingt-cinq le nombre total des cuves saturées que nous avons remplies cette année. Ces cuves ne sont pas seulement destinées aux lasers Winters ; elles sont aussi achetées par des laboratoires nationaux et des sociétés commerciales. La fréquence de dix-neuf cuves a aussi été vérifiée.

### 2.2 Mesures de longueur : nanométrie

#### 2.2.1 Diffractomètre interférométrique à laser : méthode des trois longueurs d'onde (L.F. Vitouchkine)

Nous apportons en ce moment des modifications aux éléments opto-mécaniques du diffractomètre interférométrique à laser afin de réduire l'influence des aberrations chromatiques et de diminuer la longueur des bras du diffractomètre, pour pouvoir utiliser un plus grand nombre de combinaisons de longueurs d'onde. Nous proposons d'utiliser la méthode des moindres carrés conjointement à différentes combinaisons de longueurs d'onde pour diminuer l'incertitude des mesures des pas de réseaux occasionnée par un mauvais alignement angulaire du réseau par rapport à l'angle d'autocollimation.

#### 2.2.2 Interférométrie laser pour les mesures de déplacement (L.F. Vitouchkine)

La fabrication de lasers à solide pompés par diode pour les mesures de déplacement par interférométrie laser est en cours afin de faciliter les mesures

dans le domaine du micromètre et du nanomètre. Suite à l'étude réalisée au BIPM du laser à Nd:YAG/KTP (ILP-532-10S-02) utilisant un résonateur à anneau à la longueur d'onde de 532 nm, la tête du laser et l'électronique d'asservissement de la température ont été améliorés à l'Institut de physique des lasers (Saint-Petersbourg, Féd. de Russie), ceci afin d'augmenter la stabilité de la fréquence en oscillation libre. On a observé les signaux obtenus par la technique de la troisième harmonique des transitions de la structure hyperfine de l'iode moléculaire. En même temps, le laser à Nd:VO<sub>4</sub>/KTP à résonateur linéaire à la longueur d'onde de 532 nm, mis au point également à l'Institut de physique des lasers en collaboration avec le BIPM, a été étudié pour la première fois au BIPM.

### 2.3 Gravimétrie (J.-M. Chartier et L.F. Vitouchkine)

Depuis février 2000 des mesures régulières d'accélération due à la pesanteur au site A du réseau gravimétrique du BIPM sont effectuées à l'aide du gravimètre absolu FG5-108. La préparation de la sixième comparaison internationale de gravimètres absolus (ICAG'2001) est en cours. On a prévu deux sites pour les mesures d'accélération due à la pesanteur au sous-sol du Pavillon du Mail (en construction) afin d'étendre les capacités du BIPM lors des prochaines comparaisons internationales de gravimètres.

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

### 2.4.1 Publications extérieures

1. Abramova L., Zakharenko Yu., Fedorine V., Blajev T., Kartaleva S., Karlsson H., Popescu GH., Chartier A., Chartier J.-M., International comparisons of He-Ne lasers stabilized with <sup>127</sup>I<sub>2</sub> at  $\lambda \approx 633$  nm (July 1993 to September 1995), Part VI: Comparison of VNIIM (Russian Federation), NCM (Bulgaria), NMS (Norway), NILPRP (Romania) and BIPM lasers at  $\lambda \approx 633$  nm, *Metrologia*, 2000, **37**, 115-120.
2. Acef O., Clairon A., Rovera D., Duclos F., Hilico L., Kramer G., Lipphardt B., Shelkovnikov A., Kovalchuk E., Petrukhin E., Tyurikov D., Petrovskiy M., Gubin M., Felder R., Gill P., Lea S., Absolute Frequency Measurements with a Set of Transportable He-Ne/CH<sub>4</sub> Optical Frequency Standards, *Proc. 1999 Joint Meeting EFTF/IEEE FCS*, 1999, 742-745.

3. Brown N., Jaatinen E., Suh H., Howick E., Xu G., Veldman I., Chartier A., Chartier J.-M., International comparisons of He-Ne lasers stabilized with  $^{127}\text{I}_2$  at  $\lambda \approx 633$  nm (July 1993 to September 1995), Part V: Comparison of Asian-Pacific and South African lasers at  $\lambda \approx 633$  nm, *Metrologia*, 2000, **37**, 107-113.
4. Lassila A., Riski K., Hu J., Ahola T., Naicheng S., Chenyang L., Balling P., Blabla J., Abramova L., Zakharenko Yu.G., Fedorin V.L., Chartier A., Chartier J.-M., International comparisons of He-Ne lasers stabilized with  $^{127}\text{I}_2$  at  $\lambda \approx 633$  nm, Comparison of the use of the fifth or the third harmonic-locking technique, *Metrologia*, **37**(6), accepté pour publication.
5. Viliesid M., Gutierrez-Munguia M., Galvan C.A., Castillo H.A., Madej A., Hall J.L., Stone J., Chartier A., Chartier J.-M., International comparisons of He-Ne lasers stabilized with  $^{127}\text{I}_2$  at  $\lambda \approx 633$  nm, Part VII: Comparison of NORAMET  $^{127}\text{I}_2$ -stabilized He-Ne lasers at  $\lambda \approx 633$  nm, *Metrologia*, 2000, **37**, 317-322.
6. Zarka A., Abou-Zeid A., Chagniot D., Chartier J.-M., Číp O., Cliché J.-F., Edwards C.S., Imkenberg F., Jedlička P., Kabel B., Lassila A., Lazar J., Merimaa M., Millerioux Y., Simonsen H., Têtu M., Wallerand J.-P., International comparison of eight semiconductor lasers stabilized on  $^{127}\text{I}_2$  at  $\lambda \approx 633$  nm, *Metrologia*, 2000, **37**, 329-340.

#### 2.4.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

J.-M. Chartier s'est rendu au :

- CMI, Prague (Rép. tchèque), du 25 au 27 octobre 1999, pour une réunion des personnes chargées des relations dans le domaine des longueurs au sein de l'EUROMET.
- BRGM, Paris (France), le 21 janvier 2000, invité à participer avec L.F. Vitouchkine au Groupe de travail : Réseau gravimétrique et géoïde de référence, et à faire un exposé sur les comparaisons internationales de gravimètres absolus.
- NRC, Ottawa (Canada), du 10 au 15 avril 2000, pour participer à une comparaison internationale de lasers asservis sur l'iode à  $\lambda \approx 633$  nm.
- COPL, Québec (Canada), du 15 au 19 avril 2000, pour visiter le Département de génie électrique et de génie informatique du Centre optique, photonique et laser.

L. Robertsson s'est rendu au CSIRO-NML, Lindfield (Australie), les 22 et 23 mai 2000, pour visiter le laboratoire des lasers.

R. Felder s'est rendu à :

- la société Stigma-Optique, Montgeron (France), le 14 octobre 1999, pour des discussions techniques.
- la société Fichou, Fresnes (France), le 5 avril et le 17 mai 2000, pour des discussions techniques.
- l'ENS, Paris (France), le 19 avril 2000, pour des discussions techniques.

L.F. Vitouchkine s'est rendu :

- à l'ILP et au VNIIM, Saint-Pétersbourg (Féd. de Russie), du 30 octobre au 6 novembre 1999, pour participer aux essais du laser à Nd:YAG/KTP.
- à Semmering (Autriche), les 13 et 14 janvier 2000, pour un séminaire sur le thème « Quantitative microscopy ».
- au Gosstandart, Moscou (Féd. de Russie), les 21 et 22 mars 2000, pour présider un atelier sur le thème « Nanometrology for nanotechnology ».
- à l'IPGP, Paris (France), le 11 avril 2000, pour une réunion sur les mesures gravimétriques dans l'espace.
- à l'ILP et au VNIIM, Saint-Pétersbourg (Féd. de Russie), du 15 au 23 juin 2000, pour participer aux essais du laser à Nd:VO<sub>4</sub>/KTP.

L. Robertsson, L.S. Ma et L.F. Vitouchkine ont participé à la CPEM'2000, Sydney (Australie), du 14 au 19 mai 2000, et y ont présenté ou ont été co-auteurs des posters suivants :

- « 532 nm standards at the BIPM », L. Robertsson, L.S. Ma, S. Picard, poster, article reçu après la date limite.
- « Design of Nd:YAG/KTP laser at 532 nm », M.M. Khaleev, G.E. Novikov, O.A. Orlov, S.S. Terekhov, V.I. Ustyugov, J.-M. Chartier, L.F. Vitouchkine, poster ; voir aussi *CPEM'2000 Digest*, 2000.
- « On the use of conical reflectors in laser displacement interferometry », A.L. Vitouchkine, L.F. Vitouchkine, poster ; voir aussi *CPEM'2000 Digest*, 2000.

## 2.5 Activités liées au travail des Comités consultatifs

J.-M. Chartier est secrétaire exécutif du CCL et membre, avec L.F. Vitouchkine, du Groupe de travail du CCL sur la métrologie dimensionnelle. Il est aussi membre du Groupe de travail du CCL sur la mise en pratique de la définition du mètre.

L.F. Vitouchkine préside le groupe de discussion (DG7) sur la nanométrie du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle. Il préside le Groupe de travail 6 sur les comparaisons de gravimètres absolus de l'International Gravity and Geoid Commission. Il est aussi membre, avec J.-M. Chartier, du Groupe de travail : Réseau gravimétrique et géoïde de référence.

## 2.6 Visiteurs de la section des longueurs

- M. H. Belaidi (INMETRO), le 1<sup>er</sup> octobre 1999.
- M. F. Senotier (Laserlabs, France), les 7 et 29 octobre, les 1<sup>er</sup> et 8 décembre 1999, et les 17 février, 1<sup>er</sup> mars, 20 avril, 2 et 29 mai 2000.
- M. G. Ancourt (Stigma optique, France), le 22 octobre 1999.
- M. O. Acef (BNM-LPTF), le 2 novembre 1999.
- M. S. Shelkownikov (Institut Lebedev, Féd. de Russie), le 5 novembre 1999 et le 29 mars 2000.
- M. P. Plombin (Éts. Dumas, France), les 24 novembre et 3 décembre 1999, les 15 et 30 mars, les 5 et 26 avril et les 10 et 24 mai 2000.
- M. Fournier (Meca 2000, France), le 29 novembre 1999.
- M. Y. Domnin (VNIIFTRI), le 7 décembre 1999.
- MM. Y. Domnin et V. Tenishev (VNIIFTRI), le 13 décembre 1999.
- M. M.J. Kas (CMS), le 21 janvier 2000.
- Mme N. Debeglia (BRGM), le 2 février 2000.
- M. R. Buchner (BEV), le 18 février 2000.
- M. A. Sakuma, le 22 février 2000.
- Mme G. Lipinsky (BNM-LNE), le 9 mars 2000.
- M. M. Smid (CMI), le 17 mars 2000.
- M. J. Faller (NIST/JILA), le 19 avril 2000.
- MM. Tianchu Li, Mingshou Li et Jin Qian (NIM), le 7 juin 2000.

## 2.7 Stagiaires et chercheurs invités

- MM. A.L. Vitouchkine (JILA) et J. Faller (NIST/JILA), le 19 octobre 1999, pour une présentation intitulée « Development of a portable absolute free-fall cam-driven gravimeter ».
- MM. Y.G. Zakharenko et V. Fedorine (VNIIM), Y. Domnin et V. Tenishev (VNIIFTRI), du 6 au 21 décembre 1999, pour participer à une comparaison de lasers à  $\lambda \approx 633$  nm.
- M. Y. Millerieux (BNM-INM), du 13 au 17 décembre 1999 et du 17 au 21 janvier 2000, pour une collaboration entre le BNM-INM et le BIPM sur des lasers à He-Ne asservis à  $\lambda \approx 543$  nm ; de février 2000 à mai 2000, il a consacré une partie de son temps au BIPM à des travaux sur un laser asservi à  $\lambda \approx 532$  nm appartenant au BNM-INM.
- MM. J.-M. Miehé et F. Dupont et Mme N. Debeglia (BRGM), les 1<sup>er</sup> et 2 février 2000, pour des mesures relatives de l'accélération due à la pesanteur sur le réseau gravimétrique du BIPM.
- MM. F. Bertinotto et P. Cordiale (IMGC), du 31 janvier au 4 février 2000, pour participer à une comparaison de lasers à  $\lambda \approx 532$  nm.
- MM. H. Schnatz et U. Sterr (PTB), du 31 janvier au 4 février 2000, pour participer à des comparaisons de lasers à  $\lambda \approx 532$  nm et à  $\lambda \approx 633$  nm.
- Mme M. Amalvict (École et observatoire des sciences de la Terre, Strasbourg), les 13 et 14 avril 2000, pour un essai comparatif de « super-ressorts » des gravimètres absolus FG5-108 et FG5-206.
- Mme C. Bonara, MM. M. Diament, V. Mikhailov (IPGP) et S. Bonvalor (IRD), le 30 mai 2000, pour des mesures relatives de l'accélération due à la pesanteur sur le site A du BIPM.

### **3 MASSE ET GRANDEURS APPARENTÉES** (R.S. DAVIS)

#### **3.1 Prototypes et étalons de 1 kg** (R.S. Davis ; J. Coarasa et J. Hostache)

Le prototype n° 20, le prototype national des États-Unis, et le prototype n° 4, qui appartient aussi aux États-Unis, ont été ré-étalonnés par comparaison aux étalons de travail du BIPM.

De plus, des étalons de 1 kg en acier inoxydable ont été ré-étalonnés pour les laboratoires suivants : CEM (Espagne), CESMEC (Chili), INTI (Argentine), LATU (Uruguay), et MSL (Nouvelle-Zélande).

Une étude détaillée des performances relatives des trois hygromètres à point de rosée appartenant à la section des masses du BIPM a été entreprise. Deux de ces appareils sont montés de manière permanente dans les enceintes étanches de la balance HK1000 MC et de notre nouvelle balance Metrotec. Le troisième appareil, qui est le plus précis, peut être relié à chacune de ces enceintes. La cohérence des mesures nous donne plus de confiance dans la stabilité à long terme de ces instruments. L'incertitude liée à la mesure de la température du point de rosée (ou de l'humidité relative) est la composante la plus importante de l'incertitude associée à l'étalonnage d'un étalon de 1 kg en acier inoxydable par rapport à un prototype en platine iridié.

L'étude de notre nouvelle balance Metrotec de portée 1 kg se poursuit. La répétabilité de la balance est généralement bien en-dessous de 1 µg et nous essayons de nous assurer de sa reproductibilité à ce niveau. La balance est logée dans une enceinte étanche qui a été entièrement équipée pour les mesures de température, de pression, du point de rosée et de la teneur en dioxyde de carbone. Nous avons installé un instrument *ad hoc* pour automatiser la balance, l'acquisition des données et le calcul des résultats.

#### **3.2 Balance à suspensions flexibles (A. Picard)**

La balance FB2 est utilisée quotidiennement pour plusieurs applications. Par conséquent, nous n'y avons apporté aucune modification ou amélioration cette année. Nous envisageons une commercialisation de cette balance à l'avenir et nous avons recherché une compagnie qui serait intéressée à en assurer la fabrication et le service après-vente. Nous espérons que ce projet prendra forme et que le transfert de technologie se poursuivra.

### 3.3 Objets pour la détermination de la poussée de l'air (A. Picard)

L'an passé nous avons mentionné l'accord satisfaisant obtenu entre les deux méthodes employées pour déterminer la masse volumique de l'air humide. Une de ces méthodes est fondée sur la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide du CIPM (1981/91), alors que la seconde est fondée sur des comparaisons de masse dans l'air et dans le vide permettant la détermination de la masse volumique de l'air. Ces comparaisons sont effectuées entre des objets spécialement conçus pour la détermination de la poussée de l'air et fournis par la PTB. Après cette étude, menée dans le cadre d'un projet de l'EUROMET, les deux objets ont été retournés à la PTB. Afin de poursuivre ces travaux au BIPM, deux objets en acier inoxydable de 1 kg fabriqués au BIPM ont été polis et leur masse a été ajustée. Ces masses, qui portent les références Cc (cylindre creux) et Cp (cylindre plein), ont la même surface ( $194 \text{ cm}^2$ ) mais leur volume est différent ( $V_{Cc} = 207 \text{ cm}^3$  et  $V_{Cp} = 124 \text{ cm}^3$ ). Des mesures préliminaires à la pression atmosphérique sont en cours pour estimer la stabilité de la masse des objets. Dans un proche avenir, nous envisageons de comparer les trois méthodes suivantes pour la détermination de la masse volumique de l'air humide : à partir de la formule du CIPM (1981/91) ; par détermination directe avec les objets fabriqués pour la détermination de la poussée de l'air ; et au moyen d'un nouveau réfractomètre (un projet mis en œuvre au BNM-INM et poursuivi au BIPM, comme indiqué ci-dessous) placé dans l'enceinte de la balance FB2.

### 3.4 Mesure de la masse volumique de l'air par réfractométrie

(H. Fang et A. Picard)

Ce travail est destiné à contrôler les variations de la masse volumique de l'air à l'intérieur d'une balance en utilisant le fait que les variations de la masse volumique et de l'indice de réfraction sont hautement corrélées. La fabrication de notre réfractomètre, fondé sur un projet original élaboré au BNM-INM, est maintenant terminée. Pour en rappeler le principe, une diode laser à réflexion distribuée de Bragg est utilisée pour éclairer indépendamment l'une ou l'autre des cavités d'un interféromètre Perot-Fabry double à miroirs plans. La cavité la plus courte permet d'identifier sans ambiguïté le pic de transmission de la cavité la plus longue, sur lequel la fréquence du laser est asservie. La fréquence du laser est déterminée au moyen d'une comparaison hétérodyne avec une seconde diode laser à réflexion distribuée de Bragg asservie sur une composante hyperfine du spectre du rubidium, à l'aide d'une chaîne de fréquence à battement optique jusqu'à 10 GHz.

L'étalonnage de notre instrument dans le vide est terminé. On a déterminé la valeur de l'intervalle spectral libre de la cavité la plus longue, de 100 mm, et la fréquence du laser asservi sur le Perot-Fabry par battement de fréquence après comptage du nombre d'intervalles spectraux libres. La stabilité à court et long terme de l'interféromètre Perot-Fabry a aussi été étudiée et l'étude sur la stabilité à long terme se poursuit. Pour des applications liées à la détermination de la masse volumique de l'air, l'interféromètre Perot-Fabry a été placé à l'intérieur de l'enceinte de la balance FB2. Le réfractomètre lui-même est connecté au dispositif optique à l'aide d'une fibre optique monomode.

Des déterminations de masse volumique de l'air par réfractométrie sont effectuées depuis mars 2000. Il est possible d'évaluer les variations de masse volumique de l'air en mesurant l'indice de réfraction de l'air, qui est proportionnel au rapport entre les fréquences du laser asservi à l'interféromètre, ce dernier étant placé soit dans le vide, soit dans l'air.

Jusqu'à maintenant, ce dispositif nous permet de détecter des variations de l'indice de réfraction de l'air inférieures à  $2 \times 10^{-9}$  ce qui correspond, à la pression normale, à une variation de la masse volumique de l'air de  $1 \times 10^{-5}$  en valeur relative.

Les premiers résultats montrent que la répétabilité du rapport entre la masse volumique de l'air évaluée au moyen de la formule du CIPM (1981/91) et la méthode dérivée des mesures par réfractométrie se situe dans une limite de  $5 \times 10^{-6}$  dans les conditions de l'étude.

Cette étude s'achèvera bientôt par la comparaison des deux méthodes précédentes à la méthode fondée sur des objets fabriqués pour déterminer la poussée de l'air.

### 3.5 Objets en silicium (A. Picard)

Dans le cadre de l'aide apportée au Groupe de travail du CCM sur la constante d'Avogadro, nous avons achevé l'étude de la stabilité des masses de deux objets en silicium de 115 g. Le but de cette étude était de suivre l'évolution de la différence de masse entre les objets en fonction de l'humidité relative, de la pression atmosphérique, de la température de l'air et du temps. Ce dernier paramètre est lié à la recontamination de la surface après nettoyage.

Sur une période de cinq mois et demi, les résultats montrent que la reproductibilité de la différence de masse entre les deux objets se situe dans une limite de 0,4 µg. Durant cette période, l'humidité relative a varié de 30 %

à 60 %, la pression atmosphérique de 98 500 Pa à 101 200 Pa, et la température de l'air de 20 °C à 21 °C. La différence de masse après nettoyage, entre les deux objets en silicium, se stabilise plus rapidement que celle d'étalons en platine iridié, mais les résultats finaux sont plus dispersés.

En plus des mesures effectuées à la pression atmosphérique, nous avons étudié la reproductibilité de la différence des masses du même objet mesurées dans l'air et dans le vide. Les résultats indiquent que l'effet de dégazage des objets en silicium est du même ordre que celui des objets en platine iridié, soit environ 200 ng/cm<sup>2</sup> pour la première exposition dans le vide. Des pesées successives dans l'air et dans le vide montrent que l'adsorption à la pression atmosphérique et que la désorption dans le vide (0,01 Pa) sont réversibles. Le même effet serait produit par adsorption et désorption de trois monocouches d'eau.

L'expérience sera vraisemblablement poursuivie par l'étude de l'effet du dépôt artificiel d'une couche d'oxyde de silicium sur la surface de ces objets. Des mesures analogues seront réalisées après ce traitement afin d'évaluer l'influence de cette couche d'oxyde.

### **3.6 Mesure de la fraction molaire de la vapeur d'eau dans l'air**

(A. Picard)

Pour déterminer la masse volumique de l'air humide en utilisant la formule du CIPM (1981/91), il est nécessaire de connaître, entre autres paramètres, la fraction molaire de la vapeur d'eau. Nous l'évaluons habituellement de manière indirecte en mesurant la pression atmosphérique et la température du point de rosée. Une méthode plus directe consiste à mesurer cette grandeur par absorption infrarouge en utilisant un analyseur de gaz du commerce. L'étude en cours a pour but d'évaluer les caractéristiques métrologiques de cette méthode plus directe.

Quelques mesures ont été effectuées en utilisant l'enceinte de la balance FB2 comme humidificateur passif. Nous avons fait varier la fraction molaire de la vapeur d'eau dans l'air de 1,2 % à 1,7 %, et la différence observée entre les deux méthodes s'échelonne de +0,03 % à -0,05 %. La stabilité de l'instrument du commerce utilisé pour cette étude n'est pas suffisante pour le moment. L'étude se poursuit pour améliorer la mesure directe.

### **3.7 Balance hydrostatique (C. Goyon-Taillade et L.F. Vitouchkine)**

La balance hydrostatique est destinée à déterminer le volume des étalons de masse. Le volume, combiné à la détermination de la masse volumique de l'air

(voir ci-dessus), nous permet de corriger les effets de la poussée de l'air grâce au principe d'Archimède. Un programme informatique conçu pour contrôler les échangeurs de masse a été mis au point en utilisant le langage de programmation graphique LabVIEW. Le programme a été écrit pour permettre l'acquisition simultanée des données de lecture de la balance et de mesure de la température.

Les études que nous avons menées sur la distribution et les variations de température à l'intérieur et à l'extérieur de la balance hydrostatique, selon diverses stratégies d'isolation thermique, nous ont conduit à apporter les modifications suivantes à la balance hydrostatique : les quatre moteurs utilisés pour le transfert des objets des transporteurs supérieur et inférieur aux plateaux de pesée de la balance seront montés à l'extérieur de la colonne centrale de l'appareil. Cela permet d'éliminer une source de chaleur gênante mais demande un mécanisme de transmission plus complexe. De plus, une cabine très bien isolée du point de vue thermique a été installée pour protéger l'appareil des perturbations produites par le système de conditionnement d'air de la salle.

### 3.8 Balance de torsion pour la mesure de $G$ (R.S. Davis, T.J. Quinn, S.J. Richman\* et C.C. Speake\*\* ; J. Hostache)

Nous continuons la mesure de  $G$  au moyen de la balance de torsion du BIPM (*Meas. Sci. Technol.*, 1999, **10**, 460-466). Nous avons espéré pouvoir publier les résultats obtenus en utilisant deux des trois configurations de la balance, c'est-à-dire l'asservissement électrostatique et la déflexion en mode libre. Malheureusement, à la fin de 1999 nous avons rencontré un problème lié probablement à des effets du système d'asservissement électrostatique en courant alternatif et en courant continu, problème que pour l'instant nous n'avons pas su résoudre. En excluant l'incertitude de ce fait non quantifiée du système d'asservissement électrostatique, les deux résultats obtenus présentent des incertitudes proches de  $1 \times 10^{-4}$  mais ils diffèrent d'environ  $3 \times 10^{-4}$ . L'étude se poursuit pour résoudre le problème lié à l'asservissement électrostatique, ce qui, nous l'espérons, fera disparaître l'écart entre les deux résultats.

---

\* Adresse actuelle : Massachusetts Institute of Technology (États-Unis).

\*\* Chercheur invité, université de Birmingham (Royaume-Uni).

### 3.9 Propriétés magnétiques des étalons de masse (R.S. Davis)

Une méthode mise au point au BIPM pour caractériser les propriétés magnétiques des étalons de masse a été étudiée plus en détail en collaboration avec nos collègues du SP (Borås). Récemment, nos efforts ont été consacrés à caractériser l'exactitude de l'appareillage utilisé.

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

#### 3.10.1 Publications extérieures

1. Chung J.-W., Do J.-Y., Chon B.-S., Davis R.S., Effect of the Earth's magnetic field on measurement of volume magnetic susceptibility of mass, *Metrologia*, 2000, **37**, 65-70.

#### 3.10.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

R.S. Davis s'est rendu :

- à l'OFMET, Wabern (Suisse), le 8 décembre 1999.
- à la société Mettler-Toledo, Greifensee (Suisse), le 9 décembre 1999.
- à l'IPQ, Lisbonne (Portugal), le 10 décembre 1999, pour participer à la préparation de la conférence « Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology (AMCTM 2000) ».
- au MIKES, Helsinki (Finlande), du 14 au 18 février 2000, pour participer à la réunion des personnes chargées des relations dans le domaine des masses au sein de l'EUROMET, en compagnie de A. Picard ; il y a présenté un exposé, en qualité d'invité, sur l'arrangement de reconnaissance mutuelle.
- au SP, Borås (Suède), le 24 mars 2000, pour discuter d'une collaboration sur des mesures de la susceptibilité magnétique et faire un exposé en qualité d'invité.
- au NPL, Teddington (Royaume-Uni), le 20 avril 2000, pour discuter des mesures de susceptibilité magnétique.
- à la CPEM, Sydney (Australie), du 15 au 19 mai 2000 (L.R. Pendrill, R.S. Davis, L. Neugebauer, H. Källgren et J.-E. Thor « Traceable measurements of the magnetic susceptibility of weakly-magnetic mass standards » ; S.J. Richman, C.C. Speake, T.J. Quinn et R.S. Davis « A measurement of the Newtonian constant of gravitation,  $G$ , using the BIPM torsion strip balance »).

- au PSB (Singapour), le 26 mai 2000, pour discuter d'une collaboration future entre le PSB et le BIPM.

A. Picard s'est rendu à :

- l'OFMET, Bern (Suisse), le 24 mai 2000, pour visiter le laboratoire des masses et l'expérience de balance du watt.
- à la société Sartorius, Göttingen (Allemagne), les 6 et 7 juin 2000, en compagnie de R.S. Davis.
- au CEM, Madrid (Espagne), les 20 et 21 juin 2000, pour visiter le laboratoire et pour des discussions techniques avec C. Matilla.

H. Fang s'est rendue au BNM-INM, Paris (France), le 28 avril 2000, pour des discussions techniques et pour la préparation de l'exposé pour la CPEM avec P. Juncar et L. Pendrill.

### **3.11 Activités liées au travail des Comités consultatifs**

R.S. Davis est secrétaire exécutif du CCM et fut, jusqu'au 1<sup>er</sup> mai 2000, secrétaire exécutif du CCQM.

### **3.12 Visiteurs de la section des masses**

- M. T. Fehling (Sartorius), le 4 octobre 1999 et le 24 février 2000.
- M. D. Beaglehole (Beaglehole Instruments), du 15 au 21 décembre 1999.
- M. P. Juncar (BNM-INM), le 28 février 2000.
- MM. P. Pinot, M. Lecollinet, G. Genevès (BNM-INM, BNM-LCIE), le 9 mars 2000.
- M. P. Riety (BNM-INM), le 31 mars 2000.
- Mme Y. Hong (NIM), le 29 juin 2000.
- M. S. Schlamming (Université de Zurich), le 30 juin 2000.

### **3.13 Chercheurs invités**

- M. C. Speake (Université de Birmingham), du 3 au 8 mai, du 15 au 17 mai et du 15 au 30 juin 2000.

## 4 TEMPS (G. PETIT, par intérim, puis E.F. ARIAS)

### 4.1 Temps atomique international (TAI) et Temps universel coordonné (UTC) (E.F. Arias, J. Azoubib, Z. Jiang, W. Lewandowski, G. Petit et P. Wolf ; H. Konate, P. Moussay et M. Thomas)

Les échelles de temps de référence TAI et UTC ont été régulièrement établies et publiées chaque mois dans la *Circulaire T*. Les résultats définitifs de l'année 1999 sont disponibles sous la forme de fichiers informatiques accessibles par le réseau Internet sur le site du BIPM, et sous la forme des volumes imprimés du *Rapport annuel de la section du temps du BIPM pour 1999*, volume 12 [16]. Des changements ont été introduits dans ce dernier volume, en vue de sa publication ultérieure uniquement sous forme électronique.

L'automatisation des calculs du TAI et de l'UTC est en cours, ce qui permettra de réduire les délais de publication de la *Circulaire T* [17] et de rendre le système plus fiable.

### 4.2 Algorithmes pour les échelles de temps (J. Azoubib, G. Petit et P. Wolf)

Le travail de recherche sur les algorithmes utilisés pour établir les échelles de temps comprend des études dont le but est d'améliorer la stabilité à long terme de l'échelle de temps atomique libre (EAL) et l'exactitude du TAI. Des études sont entreprises pour évaluer la possibilité d'offrir l'UTC quasiment en temps réel.

#### 4.2.1 Stabilité de l'EAL

Environ 80 % des horloges actuellement en service sont des horloges à césium du commerce du type HP 5071A et des masers à hydrogène auto-asservis actifs ; ensemble, ils contribuent pour 86 % du poids total et il en résulte une amélioration de la stabilité de l'EAL. La stabilité à moyen terme de l'EAL, exprimée au moyen de l'écart-type d'Allan relatif, est estimée à  $0,6 \times 10^{-15}$  pour des durées moyennes de vingt à quarante jours, sur la période s'étalant de janvier 1998 à mars 2000. La prédictibilité de l'UTC pour des durées moyennes d'un à deux mois s'en trouve améliorée.

#### 4.2.2 Exactitude du TAI

L'exactitude du TAI est caractérisée par l'estimation de la différence relative, et de son incertitude, entre la durée de l'intervalle d'échelle de temps du TAI et la seconde du SI telle qu'elle est produite, sur le géoïde en rotation, par les étalons primaires de fréquence. Depuis octobre 1999, six étalons primaires de fréquence ont délivré des mesures individuelles de la fréquence du TAI.

Le traitement global des mesures individuelles conduit à des différences relatives entre la durée de l'intervalle d'échelle du TAI et la seconde du SI sur le géoïde en rotation, allant depuis octobre 1999, de  $+0,2 \times 10^{-14}$  à  $+0,6 \times 10^{-14}$ , avec une incertitude-type de  $0,4 \times 10^{-14}$ .

De nouvelles procédures utilisées depuis mai 2000 ont été élaborées afin d'utiliser les étalons primaires de fréquence pour garantir l'exactitude du TAI et aussi pour rendre compte de leurs résultats [11]. Un rapport commun à la PTB et au BIPM a été soumis pour publication au sujet du compte rendu régulier des résultats des comparaisons bilatérales d'étalons primaires au TAI.

#### 4.3 Liaisons horaires (J. Azoubib, Z. Jiang, W. Lewandowski, G. Petit et P. Wolf ; H. Konate, P. Moussay et M. Thomas)

La méthode « classique » des observations simultanées des satellites du GPS utilisant des récepteurs à un seul canal et des mesures du code C/A a été étendue aux observations, effectuées avec des récepteurs à canaux multiples, utilisant l'un ou l'autre code et les deux systèmes GPS et GLONASS pour améliorer l'exactitude des comparaisons d'horloges. Pour la première fois, des comparaisons de temps et de fréquence par aller et retour sur satellite ont été prises en compte dans le calcul du TAI. De plus, la section du temps du BIPM continue à évaluer les autres méthodes de comparaison de temps et de fréquence, comme par exemple celles utilisant les mesures de phase.

##### 4.3.1 Mesures utilisant le code du Global Positioning System (GPS) et du Global Navigation Satellite System (GLONASS)

###### *i) Activités courantes*

Le BIPM publie, dans sa *Circulaire T* mensuelle, une évaluation des différences de temps quotidiennes [*UTC – temps du GPS*] et [*UTC – temps du GLONASS*] et des programmes internationaux de vues simultanées du GPS et du GLONASS. Le réseau international de liaisons par le GPS utilisé par le BIPM est constitué par des réseaux locaux à l'échelle des continents et des liaisons à longue distance, dont les données sont corrigées pour tenir compte

des mesures ionosphériques et des éphémérides précises des satellites calculées après coup. Pour la première fois, des liaisons à l'aide de récepteurs du GPS à canaux multiples ont été utilisées pour le calcul du TAI.

*ii) Détermination des retards différentiels entre les récepteurs du GPS ou du GLONASS*

Une partie de nos activités consiste à vérifier les retards différentiels entre les récepteurs du GPS fonctionnant de manière continue dans les laboratoires qui participent au TAI. En juin 1997, nous avons débuté une série d'étalonnages différentiels de récepteurs du GPS en fonctionnement dans les laboratoires de temps européens équipés de stations pour les comparaisons horaires par aller et retour. En décembre 1999, nous avons débuté des étalonnages différentiels de récepteurs du GPS et du GLONASS à canaux multiples, utilisant l'un ou l'autre code ; les laboratoires participants sont situés en Afrique du Sud, en Australie, aux États-Unis, en Europe et au Japon. La première campagne d'étalonnage de ce type s'est achevée en mars 2000 et les résultats sont en cours d'évaluation.

*iii) Normalisation des récepteurs du GPS et du GLONASS*

Le personnel de la section du temps du BIPM participe activement aux activités du sous-groupe de travail du CCTF sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS et le GLONASS. Plusieurs recommandations émises par ce sous-groupe ont pour origine certaines études menées au BIPM, qui a joué un rôle clé pour adapter le format normalisé utilisé pour les données du GPS aux observations à l'aide de récepteurs utilisant les deux systèmes, les deux fréquences, et l'un ou l'autre code. Ce format (CGGTTS Version 2) est maintenant utilisé pour les récepteurs du commerce.

*iv) Liaisons horaires utilisant des récepteurs à canaux multiples du GPS et du GLONASS*

Les premières liaisons horaires utilisant des récepteurs du GPS à canaux multiples ont été introduites dans le calcul du TAI au début de l'an 2000 [7]. L'introduction dans le calcul du TAI de liaisons réalisées à l'aide de récepteurs du GPS et du GLONASS à canaux multiples est aussi à l'étude. Des procédures ont été établies pour utiliser le code P des récepteurs à canaux multiples du GLONASS [1] et les éphémérides précises des satellites du GLONASS.

#### v) *Corrections ionosphériques estimées par l'IGS*

Les paramètres ionosphériques estimés par l'IGS sont couramment utilisés pour corriger les retards ionosphériques intervenant dans un certain nombre de liaisons à longue et moyenne distance utilisées dans le calcul du TAI [15].

#### 4.3.2 Mesures de phase

Les comparaisons de temps et de fréquence utilisant le GPS et le GLONASS peuvent être effectuées par des mesures de code, mais aussi par des mesures de la phase des porteuses aux deux fréquences émises par ces récepteurs. Cette technique, déjà couramment utilisée par la communauté des géodésistes, peut être adaptée aux besoins des comparaisons de temps et de fréquence.

Des études fondées sur un récepteur du GPS Ashtech Z12T en service au BIPM ont été menées en collaboration étroite avec le BNM-LPTF, qui possède un récepteur analogue. Il a été montré [3] que deux masers à hydrogène peuvent être comparés à distance avec une incertitude de fréquence relative de l'ordre de  $1 \times 10^{-15}$  pour une durée moyenne d'un jour, une étape prometteuse pour évaluer la possibilité d'appliquer cette technique à la comparaison des nouveaux étalons de fréquence primaires. Des étalonnages différentiels des retards des récepteurs Z12T ont été réalisés, à titre expérimental, par comparaison au BIPM à un récepteur de temps du type NBS [12]. Un étalonnage différentiel analogue du récepteur du BNM-LPTF a été réalisé. En conséquence, il est possible d'utiliser ces deux récepteurs Ashtech pour les comparaisons d'horloges, en alternative à la méthode classique des observations simultanées, avec une précision relative bien meilleure et une incertitude absolue comparable, de quelques nanosecondes. Nous effectuons un étalonnage absolu de notre récepteur Z12T pour des études menées dans le cadre du projet pilote commun à l'IGS et au BIPM, afin de pouvoir effectuer des comparaisons exactes de temps et de fréquence utilisant des mesures de phase et de code du GPS.

Les récepteurs 3S Navigation fonctionnant au BIPM délivrent des mesures de phase du GLONASS ; un logiciel a été installé pour permettre la collecte automatisée des données. L'un des récepteurs 3S collecte des données pour l'expérience IGEX'98 depuis octobre 1998. Le but de ce projet est, entre autres, de produire après coup des éphémérides précises des satellites du GLONASS. Un nouveau récepteur du GPS et du GLONASS JPS Legacy a été acheté en l'an 2000.

#### 4.3.3 Comparaisons horaires par aller et retour

Deux réunions sur les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite ont eu lieu depuis septembre 1999. Le BIPM effectue la collecte des résultats de comparaisons d'horloges par aller et retour de sept stations en activité et les traite pour certaines liaisons [4]. Un membre du personnel du BIPM assure le secrétariat du Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons d'horloges par aller et retour. Le BIPM participe aussi à l'étalonnage des liaisons horaires par aller et retour, par comparaison avec le GPS. Depuis janvier 2000, deux comparaisons d'échelles de temps par aller et retour sur satellite sont prises en compte dans le calcul du TAI ; deux autres liaisons devraient être établies en juillet 2000. La section du temps produit des rapports mensuels sur les comparaisons de temps et de fréquence par aller et retour sur satellite depuis mai 1999.

#### 4.4 Pulsars (G. Petit)

Les pulsars-milliseconde pouvant fournir un moyen de tester la stabilité à très long terme du temps atomique, nous poursuivons les collaborations avec différents groupes de radio-astronomes qui font des observations de pulsars, et en analysent les résultats. En mars 2000, la section du temps a fourni à ces groupes la version la plus récente de sa réalisation en temps différé du temps terrestre TT (BIPM2000).

Nous avons terminé notre étude sur une technique originale de recherche de nouveaux pulsars dans le ciel. L'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP) a pris le relèvement. Un programme restreint d'observations, conduit à Nançay (France) en 1998, est en cours de traitement [13].

#### 4.5 Références spatio-temporelles (E.F. Arias, G. Petit et P. Wolf)

Le Comité mixte BIPM/UAI sur les systèmes de référence spatio-temporels et la métrologie dans le cadre de la relativité générale poursuit ses activités. Un site Web donne des informations générales sur ce Comité mixte et ses principales activités (<http://www.bipm.org/WG/CCTF/JCR>).

Deux études ont été entreprises au BIPM en collaboration avec d'autres membres du Comité mixte. La première concerne l'extension du cadre relativiste pour traiter correctement les transformations des échelles de temps-coordonnée et pour réaliser le temps-coordonnée barycentrique au niveau post-Newtonien [14]. La seconde concerne la réalisation de temps-

coordonnées géocentriques. Selon le rapport du Comité mixte [9], deux résolutions seront présentées à la XXIV<sup>e</sup> assemblée générale de l'UAI.

L'uniformité des systèmes de référence spatiaux prend de plus en plus d'importance pour la métrologie de base. Cette uniformité est essentielle pour les activités qui reposent sur des ensembles de mesures, comme par exemple les techniques astronomiques de géodésie qui contribuent au Service international de la rotation terrestre (IERS). À la suite d'un appel à participation de l'IERS, le BIPM a proposé de participer avec l'IERS aux activités du Conventions Product Center.

#### 4.6 Autres études (P. Wolf)

En collaboration avec le BNM-LPTF, des scientifiques de la section du temps participent à des travaux d'évaluation sur l'utilisation éventuelle d'horloges très stables et très exactes dans l'espace pour la conservation internationale du temps, en particulier les horloges qui seront en service dans le cadre de l'expérience ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) à bord de la station spatiale internationale en 2003. Dans un environnement de micro-gravité, ces horloges à atomes refroidis par laser devraient pouvoir atteindre une incertitude relative de l'ordre de  $10^{-16}$ , ce qui représente une amélioration d'au moins un ordre de grandeur par rapport aux étalons primaires actuels sur terre. Ces horloges présenteront donc un intérêt primordial pour établir l'exactitude du TAI. Une partie importante de ce travail concerne le calcul, au niveau d'exactitude requis, des corrections relativistes qui affectent les horloges elles-mêmes et les comparaisons entre les horloges situées dans l'espace et à terre. Des calculs détaillés de ce type ont été menés en collaboration avec l'Observatoire de Paris et l'École normale supérieure (ENS).

Plus généralement, les nombreuses activités dans le domaine de l'interférométrie atomique fondée sur les atomes refroidis par laser, sur terre et à bord de satellites, ont stimulé certaines collaborations entre la section du temps et d'autres laboratoires impliqués dans ces études. C'est ainsi que P. Wolf a été détaché pendant un an au BNM-LPTF pour travailler sur un projet financé par le Centre national d'études spatiales (CNES), dont le but est d'étudier les applications éventuelles de cette technique à la physique fondamentale et à la métrologie.

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

### 4.7.1 Publications extérieures

1. Azoubib J., Lewandowski W., A test of GLONASS P-Code Time Transfer, *Metrologia*, 2000, **37**, 55-59.
2. Azoubib J., Lewandowski W., Nawrocki J., Matsakis D., Continental and Intercontinental Tests of GLONASS P-Code Time Transfer, *Proc. ION-GPS*, 1999, 1053-1056.
3. Jiang Z., Petit G., Uhrich P., Taris F., Use of GPS carrier phase for high precision frequency (time) comparison, *Int. Assoc. Geodesy Symposia* (Vol. 121, K.P. Schwarz ed.)/Springer-Verlag, 2000, 41-46.
4. Lewandowski W., Azoubib J., Time Transfer and TAI, *Proc. IEEE/EIA Int. Frequency Control Symposium*, 2000, article invité.
5. Lewandowski W., Azoubib J., Vers des transferts de temps meilleurs que la nanoseconde, *Revue XYZ*, 1999, **81**, n° 4, 21-26.
6. Lewandowski W., Nawrocki J., Azoubib J., Recent Progress in Time Transfer and Use of IGEX GLONASS Precise Ephemerides, *J. Geodesy*, accepté pour publication.
7. Nawrocki J., Lewandowski W., Azoubib J., GPS Multi-Channel Time Transfer Unit Based on a Motorola Receiver and Using CCTF Standards, *Metrologia*, 2000, **37**, accepté pour publication.
8. Petit G., Importance of a common framework for the realization of space-time reference systems, *Proc. IAG Symposium Towards an Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS)*, International Association for Geodesy Symposia/Springer-Verlag, 2000, 3-7.
9. Petit G., Report of the BIPM/IAU Joint Committee on General Relativity for Space-time Reference Systems and Metrology, *Proc. IAU Colloquium 180*, accepté pour publication.
10. Petit G., Terrestrial timescales, *Enc. Astron. Astrophys.*, IOP Pub., accepté pour publication.
11. Petit G., Use of primary frequency standards for estimating the duration of the scale unit of TAI, *Proc. 31st PTTI*, accepté pour publication.
12. Petit G., Jiang Z., Uhrich P., Taris F., Differential calibration of Ashtech Z12-T receivers for accurate time comparisons, *Proc. 14th EFTF*, accepté pour publication.

13. Rougeaux B., Petit G., Fayard T., Davoust E., Experimental set-up for detecting very fast and dispersed millisecond pulsars, *Exper. Astron.*, accepté pour publication.
14. Soffel M., Klioner S., Petit G., Wolf P., New relativistic framework for the realization of space-time reference frames and its application to time and frequency in the Solar system, *Journées 1999 Systèmes de Référence Spatio-Temporels et IX Lohrmann-Kolloquium*, 2000, 34-47.
15. Wolf P., Petit G., Use of IGS ionosphere products in TAI, *Proc. 31st PTTI*, accepté pour publication.

#### 4.7.2 Publications du BIPM

16. *Rapport annuel de la section du temps du BIPM (1999)*, 2000, **12**, 99 p.
17. *Circulaire T* (mensuelle), 6 p.

#### 4.7.3 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

E F. Arias s'est rendue à :

- Kötzing (Allemagne), du 21 au 25 février 2000, pour l'IVS 1st General Meeting and Analysis Centres Workshop.
- Turin (Italie), du 14 au 16 mars 2000, pour la 14<sup>e</sup> réunion de l'EFTF et pour la réunion des stations qui participent au Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite.
- Washington DC (États-Unis), du 27 au 31 mars 2000, pour le Colloque 180 de l'UAI, et le 3 juin 2000, pour la réunion du Conseil de l'IERS.

J. Azoubib et W. Lewandowski se sont rendus à :

- Dana Point (États-Unis), du 7 au 9 décembre 1999, pour la 31<sup>e</sup> réunion du PTTI, et pour le forum sur la normalisation du GPS et du GLONASS.
- Washington DC (États-Unis), les 13 et 14 décembre 1999, pour faire un exposé à la 7<sup>e</sup> réunion du Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite.
- Turin (Italie), du 14 au 16 mars 2000, pour la 14<sup>e</sup> réunion de l'EFTF, et pour faire un exposé à la réunion des stations qui participent au Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite.

W. Lewandowski s'est rendu :

- à Bruxelles (Belgique), 27 janvier 2000, pour participer au Galileo Science and Timing User Forum.
- au CRL, Tokyo (Japon), du 13 au 20 février 2000, pour discuter des progrès des liaisons horaires entre le Japon et la côte Pacifique.
- au CSAO, Lintong (Chine), du 21 au 26 février 2000, pour visiter les laboratoires de temps chinois.
- au SO, Shanghai (Chine), du 27 au 29 février 2000, pour discuter de la contribution de l'observatoire de Shanghai au TAI.
- à Fairfax (États-Unis), du 27 au 30 mars 2000, pour la 35<sup>e</sup> réunion du Civil GPS Service Interface Committee.
- au GUM, Varsovie (Pologne), du 25 au 28 avril 2000, pour discuter de la coordination des laboratoires de temps polonais.
- à Edimbourg (Écosse), le 3 mai 2000, pour la conférence GNSS 2000.
- à Kansas City (États-Unis), du 6 au 9 juin 2000, pour un exposé au « 2000 International Frequency Control Symposium » intitulé « Time Transfer and TAI ».

G. Petit s'est rendu à :

- Toulouse (France), les 26 et 27 octobre 1999, pour visiter le CNES et l'OMP.
- Bruxelles (Belgique), le 16 novembre 1999, pour une réunion du secrétariat européen du GNSS.
- Dana Point (États-Unis), du 6 au 9 décembre 1999, pour un exposé au 31<sup>e</sup> PTTI intitulé « Use of primary frequency standards for estimating the duration of the scale unit of TAI », et pour le forum sur la normalisation du GPS et du GLONASS.
- Paris (France), le 22 février 2000, pour une réunion sur le GNSS au ministère de la Recherche.
- Turin (Italie), du 14 au 16 mars 2000, pour des exposés au 14<sup>e</sup> EFTF intitulés « Differential calibration of Ashtech Z12-T receivers for accurate time comparisons » et « Result of the recent introduction of IGS ionospheric corrections for several TAI links ».
- Washington DC (États-Unis), du 27 au 30 mars 2000, pour un exposé au Colloque 180 de l'UAI intitulé « Report of the BIPM/IAU Joint Committee on General Relativity for Space-time Reference Systems and Metrology », et pour une réunion du Comité mixte BIPM/UAI sur les

systèmes de référence spatio-temporels et la métrologie dans le cadre de la relativité générale.

P. Wolf s'est rendu à :

- Braunschweig (Allemagne), du 10 octobre 1999 au 10 novembre 1999, invité par la PTB.
- Dana Point (États-Unis), du 7 au 9 décembre 1999, pour un exposé au 31<sup>e</sup> PTTI intitulé « Use of IGS ionosphere products in TAI ».
- Sèvres (France), les 7 et 8 mars 2000, pour la 1<sup>re</sup> réunion du Groupe de travail 1 du Comité commun au BIPM, l'ISO, la CEI, l'IFCC, l'OIML, l'UICPA, et l'UIPPA sur les guides en métrologie.
- Paris (France), depuis le 1<sup>er</sup> mai 2000, pour un détachement d'un an au BNM-LPTF.

#### 4.8 Activités en liaison avec des organisations extérieures

E.F. Arias est membre de l'UAI et du Comité d'organisation de sa Commission 19, ainsi que de ses groupes de travail sur la nutation et sur le système de référence céleste international (ICRF). Elle dirige des recherches au Bureau central de l'IERS. Elle est membre de l'IVS, et de son groupe de travail sur l'analyse de l'ICRF. Depuis janvier 2000, elle est co-présidente du projet pilote IGS/BIPM. Elle est membre de l'Argentine Council of Research et astronome associée au DANOF (Observatoire de Paris).

W. Lewandowski représente le BIPM au Civil GPS Service Interface Committee, et il préside son sous-comité sur le temps.

G. Petit participe aux travaux de l'UAI, il est vice-président de la Commission 31 sur le temps, président de son groupe de travail sur le temps des pulsars et président du Comité mixte BIPM/UAI sur les systèmes de référence spatio-temporels et la métrologie dans le cadre de la relativité générale. Il est membre du Bureau central de l'IERS (France). Il est membre du Comité national français de géodésie et géophysique.

P. Wolf est membre du Comité mixte BIPM/UAI sur les systèmes de référence spatio-temporels et la métrologie dans le cadre de la relativité générale, membre du Groupe de travail 1 du Comité commun au BIPM, à la CEI, l'ISO, l'IFCC, l'OIML, l'UICPA et l'UIPPA sur les guides en métrologie, et il participe aux activités du GREX (Groupe de recherche du CNRS : gravitation et expériences).

Le BIPM a été invité par la Commission européenne à faire part de son expérience sur l'UTC et les récepteurs des deux systèmes GPS et GLONASS,

pendant la période de définition du système de navigation européen Galileo. Le BIPM participe aux deux projets GENESIS et GEMINUS.

#### **4.9 Activités liées au travail des Comités consultatifs**

E.F. Arias est secrétaire exécutive du CCTF depuis novembre 1999.

J. Azoubib est membre du Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite et du sous-groupe de travail du CCTF sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS et le GLONASS.

W. Lewandowski est secrétaire du Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite et du sous-groupe de travail du CCTF sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS et le GLONASS.

G. Petit est membre du Groupe de travail du CCTF sur le TAI et du sous-groupe de travail du CCTF sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS et le GLONASS.

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

- MM. J. Lavery et P. Whibberley (NPL), le 4 février 2000.
- M. B. Warrington (CSIRO), le 19 juin 2000.

### **5 ÉLECTRICITÉ (T.J. WITT)**

#### **5.1 Potentiel électrique : effet Josephson (D. Reymann)**

##### **5.1.1 Mesures de réseaux de jonctions de Josephson**

Nous étalonnons de façon courante des étalons de tension à diode de Zener par comparaison à des piles étalons de référence, elles-mêmes étalonnées au moyen de notre étalon de tension à réseau de jonctions de Josephson. La tension des diodes de Zener de 10 V est convertie à une valeur proche de 1,018 V grâce à un comparateur à résistances. L'amélioration constante de la stabilité des réseaux, en particulier à 10 V, nous permet maintenant d'étalonner fréquemment des étalons à diode de Zener de 1,018 V et de 10 V

directement à l'aide d'un réseau de jonctions. Les résultats des étalonnages directs sont utilisés pour vérifier ceux effectués à l'aide des piles de référence.

Nous utilisons des réseaux de Josephson pour étalonner des potentiomètres et des voltmètres numériques pour la section d'électricité et pour d'autres sections du BIPM. Parmi ces applications, nous avons mis au point une méthode utilisant un réseau à résistances pour étalonner le comparateur.

#### 5.1.2 Projet 429 de l'EUROMET : comparaison d'étalons de tension de 10 V

Le BIPM participe au projet 429 de l'EUROMET, qui est une comparaison d'étalons de 10 V appartenant à une vingtaine de laboratoires nationaux de métrologie, au moyen de quatre étalons voyageurs à diode de Zener (*voir* le rapport du directeur de 1999, p. 108). Les étalons voyageurs ont été mesurés à quatre occasions au BIPM pour vérifier leur reproductibilité ; la dernière série de mesures s'est achevée en mai 2000.

### 5.2 Résistance électrique et impédance

#### 5.2.1 Projet 487 de l'EUROMET : utilisation d'une résistance de 100 $\Omega$ thermorégulée et stabilisée en pression comme étalon de transfert

Le BIPM participe au projet 487 de l'EUROMET, qui est une comparaison indirecte d'étalons de résistance à effet Hall quantique en courant continu au moyen d'un étalon voyageur de 100  $\Omega$ . Les laboratoires participants sont le VTT (laboratoire pilote), le BNM-LCIE, la PTB et le BIPM. L'étalon voyageur est une résistance Tinsley placée dans une enceinte thermorégulée et scellée hermétiquement, qui a été construite par le VTT. L'étalon voyageur a été comparé au BIPM en novembre 1998 à un étalon de 100  $\Omega$  du BIPM dont la valeur est déterminée, en fonction de  $R_{K-90}$ , à l'aide de l'étalon de résistance à effet Hall quantique du BIPM. Les résultats de la comparaison ont été présentés à la CPEM 2000.

#### 5.2.2 Mesures d'étalons de résistance à effet Hall quantique à des fréquences de l'ordre du kilohertz (F. Delahaye, B.P. Kibble\* et A. Zarka)

Nous avons poursuivi nos recherches sur le comportement en courant alternatif des étalons de résistance à effet Hall quantique, avec l'aide de

---

\* Chercheur invité, janvier et février 2000.

M. B.P. Kibble. Nous avons beaucoup progressé dans la compréhension des phénomènes qui sont à l'origine des pertes en courant alternatif dans les dispositifs à effet Hall quantique en Ga-As et de leur influence sur la valeur mesurée des étalons de résistance à effet Hall quantique. De plus, nous avons trouvé une méthode pour réduire le coefficient de variation en fonction de la fréquence de la résistance de Hall quantifiée à une valeur aussi faible que  $1 \times 10^{-8}$  à  $2 \times 10^{-8}$  par kilohertz, tout au moins pour un type particulier de dispositif à effet Hall quantique (hétérostructures LEP 514 fabriquées aux Laboratoires d'électronique Philips, LEP).

Nous pensons que les pertes en courant alternatif sont principalement causées par chargement dissipatif des bords du dispositif. Le chargement est dû au passage du courant de Hall et au couplage capacitif entre un bord et tout autre conducteur placé à proximité et maintenu à un potentiel alternatif différent de celui du bord, par exemple un conducteur écran. Les pertes ont deux caractéristiques principales : elles sont proportionnelles à la fréquence et elles ne sont pas linéaires. Plus précisément, la perte de puissance est strictement proportionnelle à la fréquence et elle augmente plus rapidement que le carré de la tension ou du courant appliqué. Nous suggérons que le mécanisme de perte en courant alternatif pourrait être un transfert dissipatif d'électrons entre le gaz électronique à deux dimensions et d'autres couches de l'hétérostructure, en particulier la couche GaAlAs dopée au silicium. Il est clair maintenant que le coefficient « de courant » de la résistance à effet Hall quantique (qui est en fait un coefficient de tension) est causé par la non-linéarité des pertes en courant alternatif et pas, comme nous le pensions précédemment, par l'augmentation de la température des électrons.

Les pertes peuvent être représentées par des courants de perte en phase, qui dépendent de l'amplitude de la charge en courant alternatif rejoignant ou quittant les bords. Ce modèle prédit que les coefficients de fréquence et de tension de la résistance à effet Hall quantique sont tous les deux nuls, au moins au premier ordre, quand le courant de perte d'une portion du bord à potentiel élevé est égal et de signe opposé à celui de la portion correspondante du bord à potentiel faible. Nous avons conçu et testé une méthode simple pour approcher cette condition d'équilibre. Elle consiste à placer des grilles sous les bords du dispositif et à ajuster les potentiels alternatifs des grilles de manière à ce que le coefficient de tension de la résistance à effet Hall quantique, évalué à une fréquence constante, soit égal à zéro. Cette méthode ne nécessite pas l'usage d'un étalon de résistance extérieur dont la dépendance en fonction de la fréquence serait connue. Nous avons vérifié l'effet de l'application de tensions aux grilles, correctement

ajustées selon le critère ci-dessus, à deux types différents de dispositifs GaAs/GaAlAs. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec les dispositifs LEP 514. Pour cinq échantillons différents, les coefficients résiduels de fréquence de la résistance à effet Hall quantique n'excèdent pas  $\pm 2 \times 10^{-8}$  par kilohertz. Notre méthode produit ainsi un étalon d'impédance quantique indépendant qui pourrait être utile pour la métrologie des capacités et des résistances en courant alternatif.

### 5.2.3 Conservation d'un étalon de référence de capacité et étalonnages de capacités (F. Delahaye)

La chaîne de mesure du BIPM reliant des étalons de capacité de 10 pF aux étalons de résistance à effet Hall quantique (mesurés à 1 Hz) a été utilisée trois fois cette année, pour contrôler notre groupe de quatre étalons de capacité de 10 pF. Ce groupe est utilisé pour des étalonnages de capacité. Nous offrons maintenant aux laboratoires nationaux un service d'étalonnage pour les étalons de capacité de 10 pF et de 100 pF. Les résultats sont donnés en fonction de  $R_{K-90}$  avec une incertitude-type relative de  $5 \times 10^{-8}$  pour les mesures à 1592 Hz et de  $6 \times 10^{-8}$  pour les mesures à 1000 Hz. Ce service fait l'objet d'une forte demande et nous avons étalonné cette année au total quatorze étalons de capacité pour cinq laboratoires nationaux différents.

### 5.3 Détermination du bruit et de la stabilité des étalons de tension et des nanovoltmètres (T.J. Witt)

Les instruments électroniques fondés sur des diodes de Zener sont les étalons de tension les plus couramment utilisés. Une fois étalonnés à l'aide d'un étalon de tension à effet Josephson, ils sont utilisés pour conserver et disséminer les étalons de tension et pour servir d'étalons voyageurs, y compris pour les comparaisons d'étalons de tension à effet Josephson. Nous avons identifié une dépendance significative de la tension de sortie des étalons à diode de Zener en fonction de la pression ambiante et, à un degré moindre, de la température. Les coefficients de pression et de température des étalons à diode de Zener du BIPM utilisés dans les comparaisons bilatérales ont été déterminés et des corrections peuvent être appliquées pour réduire de manière significative les incertitudes des comparaisons. Nous avons assemblé et vérifié un nouvel équipement pour déterminer les coefficients de pression et de température et nous pouvons donc maintenant offrir aux laboratoires nationaux de métrologie la possibilité de déterminer ces coefficients pour certains étalons à diode de Zener, s'ils le souhaitent.

Cette année nous avons terminé l'étude systématique de ce qui constitue la limite ultime à l'incertitude des étalons de tension à diode de Zener, le bruit en  $1/f$ . Une adjonction importante à ce travail est l'examen de la limite du bruit et de la stabilité des nanovoltmètres utilisés pour les mesures de tension.

### 5.3.1 Nouvel équipement pour la détermination des coefficients de température et de pression des étalons de tension à diode de Zener (T.J. Witt et R. Chayramy)

Une nouvelle enceinte est utilisée pour la mesure des coefficients de température et de pression des étalons à diode de Zener dans le domaine situé entre 850 hPa et 1050 hPa et entre 18 °C et 27 °C. Comparée à l'ancienne enceinte, celle-ci a été améliorée par l'adjonction de sorties multiples de tensions, qui permettent de mesurer simultanément deux diodes de Zener, et de commutateurs qui permettent de renverser la polarité, ce qui réduit les effets perturbateurs dus aux forces thermo-électromotrices.

### 5.3.2 Détermination du bruit et de la stabilité des étalons de tension à diode de Zener et des nanovoltmètres (T.J. Witt)

Nous avons appliqué cette année les résultats de nos études sur les corrélations entre mesures réalisées en série à deux problèmes importants pour les étalons de tension en courant continu : la détermination du bruit des étalons à diode de Zener et des nanovoltmètres en courant continu. Des séries temporelles de 1000 à 100 000 mesures de tension, espacées régulièrement dans le temps, sont analysées dans le domaine des fréquences à l'aide de la méthode d'analyse spectrale de puissance et dans le domaine du temps à l'aide de la variance d'Allan. La première méthode d'analyse utilise en fait un nanovoltmètre comme analyseur de spectre à basse fréquence. En ce qui concerne les diodes de Zener, l'analyse spectrale aux plus hautes fréquences montre une réponse constante qui est caractéristique du bruit blanc du nanovoltmètre. Aux basses fréquences, l'analyse spectrale varie en  $1/f$ . Si  $T$  est la durée d'échantillonnage, l'écart-type d'Allan correspondant diminue comme  $T^{-1/2}$  quand le bruit est blanc et prend une valeur constante, appelée valeur plancher du bruit en  $1/f$ , quand le bruit est en  $1/f$ . Nous interprétons ces résultats comme la mesure de la valeur minimale de l'incertitude de la moyenne de mesures répétées d'une diode de Zener. Les quinze étalons à diode de Zener que nous avons étudiés montrent tous les caractéristiques du bruit en  $1/f$ . À 10 V, treize diodes de Zener ont été comparées directement à l'étalon à effet Josephson du BIPM. La valeur plancher du bruit en  $1/f$  varie

d'une diode de Zener à l'autre mais toutes les valeurs sont situées dans un domaine allant de 20 nV à 80 nV (entre  $2 \times 10^{-9}$  et  $8 \times 10^{-9}$  de la tension de sortie nominale). Des mesures de bruit ont été effectuées sur les tensions de sortie à 1,018 V d'un petit nombre de diodes de Zener par comparaison à une pile étalon ou à un étalon à effet Josephson. Les résultats sont analogues (en fait, les étalons à diode de Zener possèdent un diviseur à résistances qui sert à dériver la tension de sortie à 1,018 V à partir de la source à 10 V) et la valeur plancher moyenne du bruit en  $1/f$  de la tension de sortie à 1,018 V est d'environ 7 nV ( $7 \times 10^{-9}$ ). La durée d'échantillonnage nécessaire pour atteindre la valeur plancher en  $1/f$  d'une diode de Zener donnée dépend de la qualité du nanovoltmètre. Pour les meilleurs d'entre eux, il est étonnamment court : de 10 s à 100 s.

Lorsque l'on interprète les mesures de bruit des diodes de Zener, il est bien sûr nécessaire de distinguer ce qui provient de la diode de Zener et ce qui provient du voltmètre, et cela nous a conduits à analyser le bruit de huit nanovoltmètres numériques et de quatre nanovoltmètres analogiques. Le facteur le plus important qui limite l'incertitude d'un voltmètre est la variation de la température ambiante, ce qui n'est pas surprenant. (Pour sept nanovoltmètres numériques, une des enceintes construites pour les études sur les diodes de Zener a été utilisée pour stabiliser la température du voltmètre ou pour faire varier la température afin de déterminer le coefficient de température). L'analyse des mesures des nanovoltmètres à température constante a aussi montré la prédominance de bruit blanc pour des durées d'échantillonnage brèves et de bruit en  $1/f$  pour des durées d'échantillonnage plus longues. Les valeurs plancher du bruit en  $1/f$  étaient généralement au moins d'un ordre de grandeur inférieur à celles des diodes de Zener.

#### **5.4 Contrôle de la température ambiante, de la pression, et de l'humidité relative (T.J. Witt et R. Chayramy)**

L'identification des subtiles variations des étalons de référence secondaires, étalons à diode de Zener ou étalons de résistance, en fonction des conditions environnantes et des besoins en précision toujours accrus des systèmes de qualité, nous ont conduits à commencer à remplacer les notations manuelles de la pression ambiante, de la température et de l'humidité relative par des enregistrements effectués à l'aide d'instruments de haute qualité dont on peut établir clairement la traçabilité. Une « station météorologique » prototype comportant un manomètre à quartz, des capteurs de température en platine et un hygromètre à point de rosée, a été installée dans le laboratoire destiné aux mesures de tension, Salle 4. Les valeurs sont visibles en temps réel sous

forme graphique sur un écran d'ordinateur et sont régulièrement sauvegardées sur disque dur et sur CD-ROM. Ces valeurs peuvent être consultées à partir de n'importe quel ordinateur par l'intermédiaire de l'Intranet du BIPM.

### 5.5 Comparaisons bilatérales d'étalons électriques au BIPM

(T.J. Witt, F. Delahaye et D. Reymann ; D. Avrons et A. Jaouen)

Le BIPM effectue en continu des comparaisons d'étalons de tension et de résistance avec les laboratoires nationaux de métrologie intéressés. Les participants comprennent à la fois les laboratoires nationaux de métrologie qui utilisent leurs propres étalons à effet Josephson et des étalons de résistance à effet Hall quantique, et ceux qui ont déterminé les valeurs et le comportement dans le temps de leurs étalons traditionnels par rapport aux étalons quantiques au BIPM (ou dans d'autres laboratoires) à la suite d'étalonnages et de comparaisons antérieures. Les participants ont le choix d'utiliser leurs propres étalons voyageurs à diode de Zener, de  $1\ \Omega$  ou de  $10\ \text{k}\Omega$ , ou ceux du BIPM.

Depuis octobre 1999, nous avons achevé les comparaisons bilatérales avec le NML (Irlande) et le CMI (Rép. tchèque). Les résultats montrent que de telles comparaisons sont efficaces pour conserver des étalons de référence exacts à plusieurs  $10^{-7}$  près dans les laboratoires, y compris quelques laboratoires nationaux de métrologie qui ne possèdent pas d'étalons à effet Josephson ou d'étalons à effet Hall quantique. Dans les laboratoires qui ne possèdent pas d'étalons quantiques, ces comparaisons peuvent confirmer l'équivalence des étalons de tension et de résistance à plusieurs  $10^{-8}$  près.

### 5.6 Étalonnages (T.J. Witt, F. Delahaye, D. Reymann et A. Zarka ; D. Avrons, R. Chayramy et A. Jaouen)

Nous avons effectué cette année les étalonnages de routine suivants : étalons à diode de Zener à 1,018 V et à 10 V pour la Belgique, le Portugal et la Roumanie ; résistances de  $1\ \Omega$  pour le Portugal et la Roumanie ; résistances de  $10\ \text{k}\Omega$  pour la Roumanie ; étalons de capacité de 10 pF pour la Belgique, la France, les Pays-Bas, le Portugal et la République tchèque ; étalons de capacité de 100 pF pour la Belgique, la France et les Pays-Bas.

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

### 5.7.1 Publications extérieures

1. Delahaye F., Kibble B.P., Zarka A., Controlling ac losses in quantum Hall effect devices, *Metrologia*, 2000, **37**(6), accepté pour publication.
2. Delahaye F., Witt T.J., Elmquist R.E., Dziuba R.F., Comparison of quantum Hall effect resistance standards of the NIST and the BIPM, *Metrologia*, 2000, **37**, 173-176.
3. Witt T.J., Reymann D., Using power spectra and Allan variances to characterize the noise of Zener-diode voltage standards, *IEE Proc. Sci. Meas. Technol.*, 2000, **147**, accepté pour publication.
4. Witt T.J., Testing for correlations in measurements, In *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology IV* (ed. P. Ciarlini, A.B. Forbes, F. Pavese and D. Rictor), World Scientific, 2000, 273-288.

### 5.7.2 Rapports BIPM

5. Reymann D., Witt T.J., Barczy O., Vrabček P., Comparison of the Josephson Voltage Standards of the SMU and the BIPM, *Rapport BIPM-99/14*, 1999, 8 p.
6. Jeanneret B., Reymann D., Witt T.J., Bilateral comparison of 10 V standards between the OFMET, Wabern, Switzerland, and the BIPM, March to May 1999, *Rapport BIPM-99/15*, 1999, 8 p.
7. Armstrong K., Power O., Reymann D., Witt T.J., Bilateral comparison of 10 V standards between the NML, Ireland, and the BIPM, June 1999, *Rapport BIPM-99/16*, 1999, 7 p.
8. Delahaye F., Witt T.J., Hartland A., Williams J.M., Comparison of quantum Hall effect resistance standards of the NPL and the BIPM, December 1997, *Rapport BIPM-99/18*, 1999, 7 p.
9. Power O., Reymann D., Witt T.J., Bilateral comparison of 1.018 V and 10 V standards between the NML, Ireland, and the BIPM, April 2000, *Rapport BIPM-2000/2*, 2000, 7 p.
10. Šebela A., Reymann D., Witt T.J., Bilateral comparison of 1.018 V and 10 V standards between the CMI, Czech Republic, and the BIPM, April 2000, *Rapport BIPM-2000/3*, 2000, 7 p.

### 5.7.3 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

T.J. Witt s'est rendu :

- à la conférence BEMC'99, Brighton (Royaume-Uni), du 2 au 4 novembre 1999 ; il y a présenté un exposé intitulé « Characterizing the noise of Zener-diode voltage standards », dont D. Reymann est co-auteur ; voir aussi *BEMC'99 Conference Digest*, 1999, 6/1-6/4.
- à Oslo, Norvège, les 10 et 11 novembre 1999, pour une réunion des personnes chargées des relations dans le domaine de l'électricité au sein de l'EUROMET ; il y a présenté un exposé intitulé « Time correlations in electrical measurements ».
- à l'IEN, Turin (Italie), le 26 octobre 1999 et le 6 mars 2000, pour des réunions du Conseil scientifique de l'IEN.
- au NPL, Teddington (Royaume-Uni), le 20 décembre 1999, pour une visite des laboratoires de mesures magnétiques et des discussions avec L.C.A. Henderson et M.J. Hall sur d'éventuelles comparaisons du CCEM dans le domaine du magnétisme.

T.J. Witt, F. Delahaye, D. Reymann et A. Zarka ont assisté à la CPEM'2000, Sydney (Australie), du 14 au 19 mai 2000, et y ont présenté ou été co-auteurs des exposés et posters suivants :

- « Effect of a back gate on the ac characteristics of quantum Hall devices », F. Delahaye, B.P. Kibble, A. Zarka, exposé par F. Delahaye ; voir aussi *CPEM'2000 Digest*, 2000, 152-153.
- « Recent developments in BIPM voltage standard comparisons », D. Reymann, T.J. Witt, P. Vrabčák, Y.H. Tang, C.A. Hamilton, A. Katkov, B. Jeanneret, O. Power, poster ; voir aussi *CPEM'2000 Digest*, 2000, 253-254.
- « Quick comparison of QHR systems using a 100  $\Omega$  transfer resistor », A. Satrapinski, H. Seppä, B. Schumacher, P. Warnecke, F. Delahaye, W. Poirier, F. Piquemal, poster ; voir aussi *CPEM'2000 Digest*, 2000, 560-561.
- « Using the Allan variance and power spectral density to characterize dc nanovoltmeters », T.J. Witt, exposé ; voir aussi *CPEM'2000 Digest*, 2000, 667-668.

T.J. Witt, F. Delahaye, D. Reymann et A. Zarka ont visité le CSIRO, Lindfield (Australie), le 19 mai 2000.

À l'occasion de la CPEM'2000, T.J. Witt a assisté aux réunions suivantes :

- discussion sur les activités du CCEM dans le domaine du magnétisme, le 15 mai ;
- Comité exécutif de la CPEM, le 18 mai ;
- Groupe de travail du CCEM sur les mesures en courant alternatif de la résistance de Hall quantifiée, le 18 mai, avec F. Delahaye ;
- Groupe de travail du CCEM sur les comparaisons clés, le 20 mai.

### **5.8 Activités en liaison avec des organisations extérieures**

T.J. Witt est membre du Conseil scientifique de l'IEN. Il est membre du Comité exécutif de la CPEM et membre de l'IEEE Measurement Systems Modernization Project. Il est expert auprès du service d'accréditation du Royaume-Uni.

F. Delahaye est membre du Groupe de travail de la CEI sur les concepts généraux en électrotechnique. Il est aussi membre du Comité commun pour les guides en métrologie.

T.J. Witt, F. Delahaye et D. Reymann sont membres du Comité technique de la CPEM'2000.

T.J. Witt a été examinateur extérieur pour la soutenance de maîtrise de James Kevin Armstrong au Dublin Institute of Technology, Dublin (Irlande), intitulée « Characterisation of the effects of time and pressure on a group of electronic voltage standards ».

### **5.9 Activités liées au travail des Comités consultatifs**

T.J. Witt est secrétaire exécutif du CCEM, membre du Groupe de travail du CCEM sur les comparaisons clés et participe aux réunions du Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences.

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

- M. J.R. Da Silva (INMETRO), le 9 décembre 1999.
- M. R. Mello Freitas (INETI), le 7 janvier 2000.
- M. M. Nunes (INETI), le 21 janvier 2000
- MM. P. Chrobok et A. Šebela (CMI), le 5 avril 2000.
- M. E. Dierikx (NMi-VSL), le 5 mai 2000.

### 5.11 Chercheurs invités

- M. B.P. Kibble (NPL), janvier-février 2000.

## 6 **RADIOMÉTRIE, PHOTOMÉTRIE, THERMOMÉTRIE ET MANOMÉTRIE (R. KÖHLER)**

### 6.1 Radiométrie (R. Köhler, R. Goebel et M. Stock)

Après l'achèvement de la comparaison supplémentaire de radiomètres cryogéniques CCPR-S3, l'ETL a demandé à effectuer une comparaison bilatérale avec le BIPM. Elle est en cours.

Les préparatifs de la comparaison clé CCPR-K2.b sont achevés. La comparaison s'effectuera en deux étapes, avec neuf participants à chaque fois. Chaque laboratoire participant recevra un lot de récepteurs comprenant deux photodiodes simples, et deux récepteurs à piège à réflexion à trois éléments. Les récepteurs ont été montés et leurs caractéristiques déterminées ; ils sont en cours d'étalonnage. Compte tenu de la charge de travail de nombreux participants, il a été décidé de retarder leur circulation, et la première étape de la comparaison devrait débuter en septembre 2000. Un protocole détaillé a été mis au point et approuvé par les participants.

Dans le domaine de la radiométrie, nous avons commencé des études relatives à la réalisation d'un étalon d'éclairement énergétique spectral dans le proche infrarouge au moyen d'un caloduc au sodium à corps noir à haute température. Le four du corps noir, commandé en 1998, n'a été livré qu'en octobre 1999. Un système de thermorégulation a été mis au point pour cet instrument, ce qui permet de stabiliser sa température à 4 mK près à 900 °C. Aux températures intermédiaires, on peut uniformiser de manière satisfaisante la température du bas du caloduc, ce qui peut être directement vérifié au moyen de radiomètres à filtre. Pour les plus hautes températures, un défaut d'uniformité d'environ 50 mK auquel nous n'avons pas trouvé de remède a été constaté. Les premières mesures de température, qui ont jusqu'ici une incertitude relative élevée, ont été faites au moyen de trois radiomètres à filtre étalonnés afin de vérifier la faisabilité de la méthode et d'identifier les difficultés qui devront être résolues lors de la prochaine étape. Un thermomètre à résistance de platine a été étalonné au BNM-INM pour vérifier

les mesures de température radiométriques. Cet étalonnage a ensuite permis d'étalonner trois autres thermomètres à résistance de platine à l'aide du caloduc à corps noir.

Une vérification des aptitudes en matière de mesure des aires d'ouverture a été faite au BIPM et à la PTB par l'échange d'une ouverture mesurée dans ces deux laboratoires. Une différence importante et non expliquée entre les résultats a été constatée ; elle provient probablement des différentes techniques de mesure employées et de problèmes associés aux petites imperfections des bords de l'ouverture. Ce travail se poursuivra par l'échange d'un autre type d'ouverture.

## 6.2 Photométrie (R. Köhler, R. Goebel et M. Stock)

Après l'achèvement des comparaisons clés CCPR-K3.a (intensité lumineuse) et CCPR-K4 (flux lumineux), une comparaison bilatérale a été effectuée entre le BIPM et le laboratoire pilote (la PTB) de ces deux comparaisons clés, afin de fournir un lien robuste entre les unités conservées au BIPM et les valeurs de référence déterminées récemment pour ces comparaisons clés. Pour la grandeur « intensité lumineuse », on a constaté que la différence était la même entre l'échelle maintenue au BIPM et la valeur de référence de la comparaison clé, aussi bien pour la comparaison clé que pour la comparaison bilatérale avec la PTB. Les résultats de mesure obtenus au BIPM sont pour le moment supérieurs de 0,3 % à ceux fondés sur la valeur de référence de la comparaison clé.

Pour le flux lumineux la situation n'est pas très satisfaisante, puisqu'une des deux séries de mesures faites au BIPM n'est pas compatible avec les autres informations dont nous disposons. En ce moment, nous ne pouvons pas offrir une explication satisfaisante à cette divergence. Depuis l'obtention des résultats de la comparaison clé, la sphère intégrante a été repeinte : les résultats de la deuxième comparaison avec la PTB et de celle effectuée avec le NIST s'accordent à 0,1 % près. Il est donc raisonnable d'attribuer une valeur de 0,3 % à 0,4 % à la différence entre l'échelle du BIPM et la valeur de référence de la comparaison clé.

Depuis le dernier ajustement des échelles du BIPM en 1986, destiné à obtenir une compatibilité étroite entre les unités de flux lumineux et d'intensité lumineuse et la moyenne internationale, nous avons le plaisir de constater, pour ces deux grandeurs, une différence comparable entre les échelles conservées au BIPM et les valeurs de référence déterminées récemment pour les comparaisons clés.

### 6.3 Manométrie (M. Stock et R. Pello)

Le manobaromètre a été réactivé et les étalonnages périodiques pour d'autres sections du BIPM ont repris après presque un an d'interruption, due à l'enlèvement de l'ancien comparateur interférentiel de règles et aux travaux de rénovation de la salle qui ont suivi.

### 6.4 Thermométrie (R. Pello)

Quatre thermomètres à résistance de platine étalons à haute température ont été étudiés pour être utilisés avec le corps noir à haute température. Deux cellules à point triple de l'eau appartenant à l'UME ont été comparées au groupe de référence du BIPM.

### 6.5 Travaux d'étalonnage (R. Goebel, R. Pello et M. Stock)

Dans le domaine de la photométrie, des lampes ont été étalonnées pour l'Autriche, l'Inde, la Pologne et la République tchèque. Des jauges à pression ont aussi été étalonnées pour d'autres sections du BIPM ; des étalonnages de ce type sont demandés environ une fois par mois. En tout, dix thermomètres ont été étalonnés pour divers laboratoires du BIPM. Trois mesureurs de puissance optique ont aussi été étalonnés pour la section des longueurs.

### 6.6 Informatique (R. Köhler et R. Goebel ; L. Le Mée et G. Petitgand)

Comme la plupart des laboratoires nationaux, le BIPM a grand besoin d'un service informatique fiable et au goût du jour pour répondre à ses besoins internes et pour maintenir et développer son site Internet.

Le site Internet du BIPM (*voir* Section 9.3) est devenu un moyen de plus en plus important pour disséminer des informations intéressantes pour la métrologie au niveau international. Avec l'adjonction de la base de données du BIPM sur les comparaisons clés (*voir* Section 8) le site est devenu une importante source de référence. Pour répondre aux demandes d'accès au site, la vitesse de connection à l'Internet a été doublée. De plus, de nouveaux équipements et logiciels ont été installés pour protéger le site. La sécurité du site a été vérifiée par une société extérieure qui l'a trouvée excellente.

La nécessité de moderniser les services informatiques internes reste élevée, la plupart des expériences étant maintenant contrôlées par ordinateur et faisant appel à un travail en réseau pour un traitement efficace des données. De nombreux ordinateurs personnels ont été installés pour permettre un accès généralisé au réseau interne du BIPM (Intranet) et au courrier électronique.

Pour utiliser efficacement les technologies modernes, le personnel doit avoir les moyens d'être informé et formé à l'utilisation des nouveaux logiciels. Il est aussi extrêmement souhaitable de pouvoir bénéficier de l'aide d'un personnel disponible pour donner une réponse immédiate à une multitude de questions quotidiennes et résoudre les problèmes matériels de routine.

En réponse à tout cela, j'ai commencé à étudier comment bénéficier au mieux des moyens qu'offre cette technologie qui évolue rapidement et comment utiliser au mieux le nombre restreint de personnes hautement qualifiées disponibles.

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

### **6.7.1 Publications extérieures**

1. Köhler R., International comparisons in photometry and radiometry, *Proc. CIE Symposium'99 "75 Years of CIE Photometry"*, CIE, 1999, 120-123.
2. Novikova S.I., Pello R., Stock M., Calibration of VNIIM's piston-cylinder pressure balance by BIPM primary standard, *Meas. Tech.*, 1999, **42**, 70-72.
3. Ohno Y., Köhler R., Stock M., An ac/dc technique for the absolute integrating sphere method, *Metrologia*, 2000, **37**, 579-582.
4. Quinn T.J., On the use of the term "scale(s)" in radiometric and photometric metrology: Comment on the letter from J.L. Gardner, *Metrologia*, 2000, **37**, 543.
5. Stock M., Goebel R., Practical aspects of aperture-area measurements by superposition of Gaussian laser beams, *Metrologia*, 2000, **37**, 629-632.

### **6.7.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)**

R. Köhler s'est rendu :

- à Madrid (Espagne), pour la conférence NEWRAD'99, du 25 au 27 octobre 1999, où il a fait deux exposés intitulés « International comparisons in photometry and radiometry » et « Ac/dc technique for the absolute integrating sphere method » ; pour le Groupe de travail du CCPR sur les comparaisons clés, le 24 octobre 1999 ; pour l'atelier sur l'ultraviolet organisé par la PTB, le 28 octobre 1999 ; pour le Groupe de travail du CCPR sur l'ultraviolet dans l'air, le 29 octobre 1999.

- au PSB (Singapour), le 6 décembre 1999, pour une visite des laboratoires et un exposé intitulé « Radiometry and photometry at the BIPM and activities of the CCPR ».
- au CSIRO, Lindfield (Australie), le 13 décembre 1999, pour une visite des laboratoires et des discussions.
- au BNM-INM, Paris (France), le 11 janvier 2000, pour transporter des thermomètres à résistance de platine étalons et pour des discussions au sujet du Groupe de travail 3 du CCT.
- à l'IPQ, Lisbonne (Portugal), du 10 au 13 mars 2000, à la conférence « Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology (AMCTM 2000) » pour un exposé intitulé « Estimators for key comparison reference values ».
- au SMU, Bratislava (Slovaquie), du 27 au 29 mars 2000, pour une réunion des personnes chargées des relations dans le domaine de la thermométrie au sein de l'EUROMET.
- à l'UME, Istanbul (Turquie), du 3 au 5 avril 2000, pour une réunion des personnes chargées des relations dans le domaine de la radiométrie et de la photométrie au sein de l'EUROMET.
- au NPL, Teddington (Royaume-Uni), les 5 et 6 juin 2000, pour une réunion commune au Groupe de travail du CCPR sur les comparaisons clés et aux représentants des organisations régionales de métrologie.

M. Stock s'est rendu :

- à Madrid (Espagne), à la conférence NEWRAD'99, du 25 au 27 octobre 1999, pour présenter un poster sur « Practical aspects of aperture area measurements using the laser beam scanning technique ».
- à la PTB, Braunschweig (Allemagne), les 13 et 14 décembre 2000, pour une réunion des personnes chargées des relations dans le domaine de la photométrie et de la radiométrie au sein de l'EUROMET au sujet des aptitudes des laboratoires en matière de mesurages et d'étalonnages.
- au BNM-INM, Paris (France), le 11 février 2000, pour apporter le thermomètre à étalonner et pour des discussions sur les thermomètres à résistance de platine et les thermocouples.

R. Goebel s'est rendu à Madrid (Espagne), à la conférence NEWRAD'99, du 25 au 27 octobre 1999, pour présenter un poster sur « Results of an international comparison of cryogenic radiometers ».

### **6.8 Activités liées au travail des Comités consultatifs**

R. Köhler est secrétaire exécutif du CCT et du CCPR, secrétaire des groupes de travail du CCT et du CCPR sur les comparaisons clés et membre du Groupe de travail 3 du CCT.

### **6.9 Activités en liaison avec les organisations internationales**

R. Köhler assure la liaison entre le CCPR et les divisions 1 et 2 de la CIE. Il est membre des comités techniques suivants de la division 2 de la CIE : TC2-37 (photomètres), TC2-43 (incertitudes) et TC2-29 (linéarité).

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

- M. R. Datla (NIST), pour remettre des lampes et visiter les laboratoires, le 21 octobre 1999.
- M. M. Briaudeau (BNM-INM), le 18 novembre 1999.
- Mme A. Doğan (UME), pour remettre deux cellules à point triple de l'eau, le 24 janvier 2000.
- M. R. Buchner (BEV), pour remettre des lampes, le 18 février 2000.
- M. J. Hartmann (PTB), pour des discussions, le 13 mars 2000.
- M. M. Smid (CMI), pour remettre des lampes, le 17 mars 2000.
- M. W. Mitkovits (BEV), pour prendre des lampes, le 30 juin 2000.

### **6.11 Étudiants**

- M. T. Hasebe, du 1<sup>er</sup> mars au 31 août 2000.

## **7 RAYONNEMENTS IONISANTS** (P.J. ALLISY-ROBERTS)

### **7.1 Rayons x et $\gamma$** (P.J. Allisy-Roberts et D.T. Burns ; P. Roger)

#### **7.1.1 Facteurs de correction pour les chambres étalons à paroi d'air**

Nous continuons à utiliser le programme de calcul de Monte Carlo EGS4 pour calculer les facteurs de correction pour la perte d'électrons et pour la diffusion des photons à appliquer aux chambres étalons à paroi d'air. En faisant varier les paramètres du modèle de transport des électrons, nous avons découvert une dépendance en fonction du paramètre qui définit la taille minimale des pas des électrons. Ceci conduit à des valeurs plus basses pour le facteur de correction pour la perte d'électrons. En conséquence, la nouvelle valeur pour la chambre du NMI, pour une qualité de faisceau de 50 kV(a), est inférieure de 0,4 % à la valeur calculée par ce laboratoire. Le NMI a récemment confirmé ce résultat et a maintenant adopté une valeur plus basse pour son étalon. Des facteurs de correction calculés au BIPM ont aussi été fournis à l'ARPANSA et au NIST.

#### **7.1.2 Étalons et équipements pour la dosimétrie**

Après presque quarante années de service, le générateur à haute tension de polarité négative, utilisé pour fournir des rayons x aux énergies basse et moyenne, est tombé en panne et s'est avéré impossible à réparer. Un nouveau générateur Seifert de 160 kVa été acheté et le voltmètre actuel a été modifié pour y être adapté. Une nouvelle méthode d'asservissement, fondée sur des équipements du commerce, a été appliquée à ce générateur, afin de stabiliser la tension du tube à rayons x à environ 0,1 V près. Les études ont commencé pour caractériser les qualités de rayonnement de référence du CCRI pour les rayons x aux basses énergies.

Le système de mesure actuel destiné aux étalons de dosimétrie pour le rayonnement gamma et pour les rayons x de moyenne énergie a été modifié. Un électromètre Keithley 642 remplace maintenant l'électromètre Cary devenu difficile à entretenir. L'ordinateur de contrôle et le logiciel d'acquisition des données ont aussi été remplacés par d'autres plus récents pour faire face aux problèmes de passage à l'an 2000. Les systèmes de conditionnement d'air vieux de trente ans ont été remplacés, entraînant la fermeture de tous les laboratoires de dosimétrie pendant deux mois.

Une nouvelle source de  $^{60}\text{Co}$  et une enceinte ont été commandées pour les étalons de dosimétrie destinés aux mesures de kerma dans l'air et de dose absorbée. (L'enceinte actuelle ne répond pas aux normes actuelles pour le transport de matières radioactives). L'ancienne source continue à être utilisée pour les comparaisons et les étalonnages.

### 7.1.3 Comparaisons de dosimétrie

Nous continuons à analyser les résultats des comparaisons de kerma dans l'air pour les rayons x effectuées l'an passé et à en rédiger les comptes rendus. Les rapports sur les comparaisons avec le NMI et l'ENEA ont été publiés, et les rapports des comparaisons avec le NPL, le NRC, l'OMH, la PTB et le VNIIM sont en préparation. Dans l'éventualité d'une panne du générateur de rayons x, nous n'avons pas effectué de comparaisons de rayons x depuis octobre 1999. Cependant, nous avons programmé des comparaisons de rayons x avec le BEV et l'OMH en l'an 2000.

Nous n'avons effectué aucune comparaison en dosimétrie d'étalons de kerma dans l'air du rayonnement gamma depuis l'an passé, mais six sont prévues avec l'OFMET, la PTB et le SMU avant la fin de l'an 2000. Nous continuons à analyser les précédentes comparaisons de kerma dans l'air et à en rendre compte ; le rapport sur la comparaison avec le NRC a été publié et cinq rapports relatifs aux comparaisons avec le BARC, l'ENEA et le NPL sont en préparation. Une première comparaison de dose absorbée dans le rayonnement du  $^{60}\text{Co}$  a été effectuée avec le NMI. Les résultats ont été analysés et le projet de rapport est achevé. Les rapports sur les comparaisons de dose absorbée avec l'ARPANSA, le LSDG et le NRC ont été publiés, et un rapport sur la comparaison avec le NPL est en préparation.

Les résultats de chacune de ces comparaisons sont mis au format requis pour la base de données du BIPM sur les comparaisons clés. Le CCRI a décidé que seuls les résultats publiés au cours des dix dernières années seront inclus dans la base. Les résultats plus anciens seront simplement référencés.

Le BIPM organise une comparaison clé du CCRI d'étalonnage de chambres d'ionisation pour la mesure de la dose absorbée dans l'eau dans le rayonnement gamma du  $^{60}\text{Co}$  et il y participe, avec les laboratoires nationaux de métrologie suivants qui conservent des étalons primaires : l'ARPANSA, le BEV, le BNM-LNHB, l'ENEA, le NIST, le NPL, le NRC et la PTB. Trois chambres d'ionisation de différents types (l'une d'entre elles a été prêtée par l'OMH) ont été envoyées tour à tour à chaque laboratoire national de métrologie pour étalonnage. Les chambres sont transportées à la main et

retournées pour un nouvel étalonnage au BIPM après que chaque laboratoire national de métrologie les ait mesurées. Les mesures ont déjà été faites à l'ARPANSA, au BEV, au BNM-LNHB et au NPL.

La comparaison supplémentaire du CCRI d'étalons de dose absorbée dans l'eau pour le rayonnement du  $^{60}\text{Co}$  à des niveaux de dose élevés (jusqu'à 30 kGy) s'est achevée cette année. Les résultats, qui ont depuis été présentés au CCRI et à l'ICRU, sont en cours de préparation en vue de leur publication.

Les quatre chambres de transfert pour le projet de comparaison de dose absorbée aux hautes énergies continuent à être mesurées périodiquement dans le faisceau de  $^{60}\text{Co}$  du BIPM ; elles ont un comportement cohérent.

#### 7.1.4 Étallonages pour la dosimétrie

Seize étalonnages d'étalons secondaires pour le BARC, le CIEMAT et le CRRD, ont été réalisés dans les faisceaux de rayons x ou de rayonnement  $\gamma$ , pour mesurer le kerma dans l'air ou la dose absorbée dans l'eau. La collaboration avec l'AIEA se poursuit sur l'irradiation de leurs dosimètres thermoluminescents dans le rayonnement du  $^{60}\text{Co}$ , dans le cadre du programme de travail avec les laboratoires secondaires de dosimétrie (SSDL programme).

### 7.2 Radionucléides (C. Michotte et G. Ratel ; C. Colas, M. Nonis et C. Veyradier)

#### 7.2.1 Comparaison de mesures d'activité d'une solution de $^{204}\text{Tl}$

Le groupe de travail de la Section II du CCRI, sur l'analyse des résultats de la comparaison internationale de  $^{204}\text{Tl}$ , s'est réuni en février 2000. Sa mission est d'identifier pour quelles raisons on a observé des écarts entre les résultats de la comparaison, et de mettre en œuvre des actions pour éviter que des problèmes analogues se reproduisent dans les comparaisons à venir. La plupart des discussions ont porté sur la composition de la solution radioactive utilisée, et sur la préparation à venir de sources solides, ce qui présente certaines difficultés (adsorption et activité résiduelle, composition chimique, concentration de l'entraîneur et acidité). Des méthodes de mesure par traçage de l'efficacité ont aussi été discutées en détail, ainsi que certaines incohérences dans les valeurs et la présentation des incertitudes. On a constaté que les techniques de scintillation liquide donnent des résultats cohérents pour le  $^{204}\text{Tl}$ . Le groupe de travail a constaté qu'il sera nécessaire de consacrer des efforts considérables à d'autres études avant de pouvoir

effectuer une nouvelle comparaison. Reconnaisant l'utilité des réunions de ce groupe de travail, M. Los Arcos (CIEMAT) est invité à organiser une réunion analogue pour discuter des problèmes soulevés par l'extension du SIR aux émetteurs de rayonnement bêta.

### 7.2.2 Comparaison de mesures d'activité d'une solution de $^{152}\text{Eu}$

La comparaison préliminaire de mesures d'activité d'une solution de  $^{152}\text{Eu}$  entre cinq laboratoires (le BNM-LNHB, l'ETL, le NRC, l'OMH et la PTB), que l'on avait évoquée un rapport de l'an passé, a donné des résultats dont l'accord est satisfaisant. Un rapport a été préparé et distribué aux participants. Le reste des ampoules, contenant les aliquotes de la même solution, a été distribué à dix-huit autres laboratoires (le BARC, le BEV, le CIEMAT, le CMI-IIR, le CNEA, l'ENEA, l'IFIN, l'INMETRO-LNMRI, l'IRA-OFMET, l'IRMM, le KRISS, le NIM, le NIST, le NPL, le PSPKR, le RC, le SMU et le VNIIM). Jusqu'à présent, quinze résultats ont été communiqués au BIPM, qui a aussi participé à la comparaison. Quand le BIPM aura reçu le reste des résultats, un rapport sera préparé pour discussion, avant d'inclure les résultats dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés.

### 7.2.3 Comparaison de mesures d'activité d'une solution de $^{89}\text{Sr}$

Une comparaison de mesures d'activité d'une solution de  $^{89}\text{Sr}$ , qui est principalement un émetteur de rayonnement bêta, était envisagée pour le premier semestre de l'an 2000 par la Section II du CCRI. La solution de  $\text{SrCl}_2$  diluée dans une solution d'HCl a été préparée par la PTB et distribuée dans 30 ampoules contenant chacune environ 2 g de la préparation radioactive, avec une activité spécifique d'environ  $270 \text{ kBq g}^{-1}$  à la date de référence, le 15 avril 2000. Des mesures préliminaires de l'une des ampoules au moyen du spectromètre Ge(Li) du BIPM ont permis d'identifier du  $^{85}\text{Sr}$  en impureté dans la solution. D'autres études ont permis de déterminer le rapport entre l'activité du  $^{85}\text{Sr}$  et celle du  $^{89}\text{Sr}$ . La PTB a aussi identifié du  $^{85}\text{Sr}$ , du  $^{84}\text{Rb}$  et du  $^{86}\text{Rb}$ , et recherche la présence éventuelle d'autres éléments contaminants comme le  $^{90}\text{Sr}$  et le  $^{90}\text{Y}$ . Les ampoules ont été envoyées par le BIPM aux autres laboratoires participants (l'ANSTO, le BARC, le BNM-LNHB, le CIEMAT, le CMI-IIR, le CNEA, l'ENEA, l'ETL, l'IFIN, l'INMETRO-LNMRI, l'IRA-OFMET, l'IRMM, le KRISS, le NIM, le NIST, le NPL, l'OMH, le PSKR, la PTB, le RC et le VNIIM). La valeur de la période radioactive  $T_{1/2} = 50,53 \text{ d}$ ;  $u = 0,07 \text{ d}$  [*PTB-Bericht PTB-Ra-16/5*, Braun-

schweig, septembre 1998] a été adoptée. La date limite pour envoyer les résultats au BIPM est le 1<sup>er</sup> décembre 2000.

Parallèlement, la PTB a envoyé 6 ampoules de <sup>89</sup>Sr, dont l'activité spécifique est de 30,35 MBq g<sup>-1</sup>, au BIPM, pour être mesurées dans les chambres d'ionisation du SIR, afin d'étudier l'efficacité des chambres pour les émetteurs de rayonnement bêta.

#### 7.2.4 Comparaison de mesures d'activité d'une solution de <sup>238</sup>Pu

La Section II du CCRI a aussi décidé d'entreprendre une comparaison de mesures d'activité d'une solution de <sup>238</sup>Pu. Un questionnaire a été rédigé et envoyé par le BIPM aux laboratoires nationaux pour les inviter à y participer. L'ANSTO, le BIPM, le BNM-LNHB, le CIEMAT, le CNEA, l'IFIN, l'IRA-OFMET, l'IRMM, le NIST, le NPL, l'OMH, le PSPKR, la PTB, le RC, le SMU et le VNIIM ont accepté d'y participer. La solution sera préparée par le NPL et les ampoules seront distribuées par le BIPM au cours du second semestre de l'an 2000 afin que les mesures (utilisant la valeur adoptée  $T_{1/2} = 3,203 \times 10^4$  d ;  $u = 0,011 \times 10^4$  d, voir *PTB-Bericht PTB-Ra-16/5*, Braunschweig, septembre 1998) soient achevées avant la fin de l'année. La date limite pour envoyer les résultats a été fixée au 1<sup>er</sup> décembre 2000.

#### 7.2.5 Système international de référence pour la mesure d'activité d'émetteurs de rayonnement gamma (SIR)

En 1999, quatorze laboratoires (l'ANSTO, le BARC, le BNM-LNHB, le CIEMAT, le CMI-IIR, l'ETL, le KRISS, le LNMRI, le NAC, le NIM, le NIST, le NPL, l'OMH et la PTB) ont envoyé au BIPM 33 ampoules remplies de 17 radionucléides. En conséquence 22 nouveaux résultats ont été retenus dans le SIR pour le <sup>54</sup>Mn, le <sup>57</sup>Co (2 résultats), le <sup>59</sup>Fe, le <sup>60</sup>Co (3 résultats), le <sup>65</sup>Zn, le <sup>88</sup>Y (3 résultats), le <sup>131</sup>I (2 résultats), le <sup>137</sup>Cs, le <sup>139</sup>Ce (2 résultats), le <sup>153</sup>Sm (2 résultats), le <sup>166m</sup>Ho, le <sup>192</sup>Ir et le <sup>203</sup>Hg (2 résultats). D'autres résultats sont attendus pour le <sup>51</sup>Cr, le <sup>57</sup>Co, le <sup>65</sup>Zn, le <sup>67</sup>Ga, le <sup>141</sup>Ce et le <sup>201</sup>Tl. Le nombre total d'ampoules mesurées depuis le début du SIR est de 780, correspondant à un total de 545 résultats indépendants pour 58 radionucléides différents.

En plus des ampoules étalonnées par divers laboratoires, nous avons aussi mesuré dans le SIR 30 ampoules d'une solution de <sup>152</sup>Eu préparées par la PTB (25 d'entre elles ont été envoyées aux laboratoires pour la comparaison de mesures d'activité), un chiffre en augmentation de plus de 9 % en 1999 par

rapport à l'année précédente. Le rôle central joué par le SIR pour établir l'équivalence entre les laboratoires explique ce regain d'intérêt.

Comme toujours, chaque nouveau résultat est d'abord communiqué au laboratoire national de métrologie qui l'a soumis. Cependant, la mise en œuvre de l'arrangement de reconnaissance mutuelle et le rôle central du SIR ont obligé la Section II du CCRI à définir une nouvelle politique afin d'approuver les résultats. Tout d'abord, un bilan d'incertitude complet doit être soumis en même temps que les résultats ; ensuite, il n'est possible de retirer un résultat, dans le mois qui suit sa réception, que s'il s'agit d'une étude pilote. Les échantillons soumis dans le cadre d'une étude pilote ne seront pas utilisés pour établir l'équivalence. Ces décisions entraînent des changements dans le formulaire de rapport pour le SIR.

Les résultats enregistrés dans le SIR pour le  $^{125}\text{I}$  ont été modifiés, sur recommandation de la Section II du CCRI, par l'utilisation de la valeur de sa demi-vie recommandée par l'AIEA (59,43 d ;  $u = 0,06$  d) au lieu de la valeur choisie en 1976 dans le SIR (c'est-à-dire 60,14 d ;  $u = 0,11$  d). Cependant, les activités équivalentes révisées de  $^{125}\text{I}$  ne changent généralement pas beaucoup. De plus, pour les solutions contenant du  $^{126}\text{I}$  en impureté, la correction correspondante a été évaluée à partir de valeurs plus récentes de sa demi-vie et de son activité équivalente. De nouveau, cela ne change pas beaucoup les activités équivalentes de  $^{125}\text{I}$ .

#### 7.2.6 Courbe d'efficacité du SIR

La courbe d'efficacité des chambres d'ionisation du SIR a été modifiée pour les basses énergies (< 100 keV). La fonction exponentielle croissante, utilisée comme courbe de lissage pour les facteurs  $f$ , a été remplacée par une courbe polynomiale du troisième ordre dont les coefficients sont obtenus par une méthode qui sera expliquée dans un rapport actuellement en préparation. Par ailleurs, on applique maintenant une correction pour les radionucléides qui émettent un rayonnement bêta aux hautes énergies contribuant au courant d'ionisation. Cette correction est déduite de la courbe d'efficacité bêta de la chambre d'ionisation du SIR obtenue par M. Rytz, à l'aide d'émetteurs bêta quasiment purs, après vérification et mise à jour à l'aide de données plus récentes.

### 7.2.7 Spectrométrie de rayonnement gamma

Les courbes d'efficacité du spectromètre Ge(Li) ont été complétées en utilisant des ampoules de  $^{51}\text{Cr}$  et de  $^{88}\text{Y}$  du SIR. La stabilité à long terme du détecteur Ge(Li) est contrôlée au moyen de mesures périodiques d'ampoules de  $^{137}\text{Cs}$  et de  $^{60}\text{Co}$ . Une tendance à la décroissance est maintenant confirmée pour ces deux ampoules, avec un effet plus prononcé pour le  $^{60}\text{Co}$ . Une interprétation possible de ce phénomène pourrait être une diminution lente du volume actif du détecteur.

Le but principal du spectromètre gamma du BIPM est d'effectuer des vérifications d'impureté dans les ampoules du SIR. Il a été utilisé à cet effet pour des solutions de  $^{152}\text{Eu}$  et de  $^{153}\text{Sm}$ . Dans ce dernier cas, un résultat aberrant dans le SIR s'est révélé dû à une sous-estimation des impuretés par le laboratoire participant, qui a en conséquence retiré son résultat du SIR. Le spectromètre gamma du BIPM a aussi été utilisé pour des mesures secondaires d'activité du  $^{152}\text{Eu}$  et du  $^{237}\text{Np}$  pendant les comparaisons internationales (CCRI(II)-K2.Eu-152 et EUROMET-416, respectivement); les résultats obtenus étaient en accord avec ceux des autres participants, compte tenu des incertitudes.

Le spectromètre Ge(Li) sera remplacé par un spectromètre HP-Ge dans un proche avenir. Le nouvel amplificateur de spectrométrie (Canberra 2026) a été remplacé par un amplificateur d'une génération plus ancienne, modèle 2024, car ce dernier donne une meilleure résolution de l'énergie gamma, bien que le fabricant affirme que le nouveau modèle offre les mêmes spécifications. Le logiciel Genie-2000 est utilisé pour l'acquisition des données mais nous préférons utiliser le logiciel Fitzpeak pour l'analyse du pic de rayonnement gamma. Nous avons commencé à étalonner l'efficacité de ce nouveau système, selon une méthode analogue à celle qui avait été utilisée avec succès pour le spectromètre Ge(Li).

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

### 7.3.1 Publications extérieures

1. Michotte C., Influence of radioactive impurities on the SIR measurements, *Appl. Radiat. Isot.*, 2000, **52**, 319-323.
2. Van Dijk E., Grimbergen T.W.M., Burns D.T., Boutillon M., Comparison of the air kerma standards of the NMi and the BIPM in the low-energy x-ray range, *NMi-VSL Report S-TS-00.01*.

### 7.3.2 Rapports BIPM

3. Burns D.T., Toni M.P., Bovi M., Comparison of the air-kerma standards of the ENEA-INMRI and the BIPM in the low-energy x-ray range, *Rapport BIPM-99/11*, 1999, 10 p.
4. Allisy-Roberts P.J., Burns D.T., Shortt K.R., Ross C.K., Comparison of the air kerma standards of the NRC and the BIPM for  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  rays, *Rapport BIPM-99/12*, 2000, 10 p.
5. Allisy-Roberts P.J., Burns D.T., Shortt K.R., Seuntjens J.P., Comparison of the standards of absorbed dose to water of the NRC, Canada and the BIPM for  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  rays, *Rapport BIPM-99/13*, 2000, 12 p.
6. Allisy-Roberts P.J., Burns D.T., Boas J., Huntley R.B., Wise K.N., Comparison of the standards of absorbed dose to water of the ARPANSA and the BIPM for  $^{60}\text{Co}$  gamma radiation, *Rapport BIPM-99/17*, 2000, 15 p.
7. Allisy-Roberts P.J., Burns D.T., Palmans H., Comparison of the standards of absorbed dose to water of the LSDG, Belgium and the BIPM for  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  rays, *Rapport BIPM-2000/01*, 2000, 10 p.

### 7.3.3 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

P.J. Allisy-Roberts s'est rendue :

- au NPL, Teddington (Royaume-Uni), le 15 septembre 1999, au BEV, Vienne (Autriche), le 5 novembre 1999, et au BNM-LNHB, Saclay (France), le 7 janvier 2000, pour y apporter les instruments de transfert pour la comparaison supplémentaire de la Section I du CCRI.
- à Londres (Royaume-Uni), le 18 octobre 1999, le 9 mars et le 21 juin 2000, pour l'U.K. Health and Safety Commission Ionizing Radiation Advisory Committee (IRAC) ; le 13 avril 2000, pour participer au comité de rédaction du *Journal of Radiological Protection*.
- à Richmond (Royaume-Uni), les 25 et 26 octobre 1999, pour l'U.K. Department of Trade and Industry – Measurement Advisory Committee (MAC).
- à Brighton (Royaume-Uni), du 1<sup>er</sup> au 3 novembre 1999, pour présenter l'article intitulé « International equivalence and traceability in radiotherapy dosimetry » à la National Measurement Conference.

- à Teddington (Royaume-Uni), les 23 et 24 novembre 1999, pour présider les « MAC review of the NPL acoustics and ionizing radiation programmes » ; le 27 juin 2000, pour le British Committee on Radiation Units (BCRU).
- à Athènes (Grèce), du 15 au 17 mai 2000, pour effectuer un audit du laboratoire national d'étalons dosimétriques au nom de l'AIEA.

D.T. Burns s'est rendu à :

- Richmond-Upon-Thames (Royaume-Uni), du 8 au 10 décembre 1999, pour présenter l'article intitulé « BIPM comparisons of standards for air kerma and absorbed dose in  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -radiation » au NPL Workshop on recent advances in calorimetric absorbed dose standards.
- à Mol (Belgique), les 24 et 25 janvier 2000, comme représentant du BIPM à la réunion des personnes chargées des relations dans le domaine des rayonnements ionisants au sein de l'EUROMET, qui a eu lieu à proximité de l'IRMM.
- à Melbourne (Australie), du 20 au 31 mars 2000, pour y apporter les instruments de transfert pour la comparaison supplémentaire de la Section I du CCRI, pour effectuer des mesures dans le cadre d'une comparaison avec l'ARPANSA et pour présenter le travail de la section des rayonnements ionisants du BIPM.
- à Oslo (Norvège), les 4 et 5 mai 2000, comme représentant du BIPM à la réunion des personnes chargées des relations dans le domaine des rayonnements ionisants au sein de l'EUROMET, qui a eu lieu au NRPA.

C. Michotte s'est rendue à Louvain-la-Neuve (Belgique), le 23 février 2000, pour présenter aux étudiants son expérience de physicienne, à la Journée portes ouvertes de l'université catholique de Louvain.

C. Michotte et G. Ratel se sont rendus à Lisbonne (Portugal), du 10 au 13 mai 2000, pour la conférence « Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology (AMCTM 2000) ». G. Ratel y a présenté un poster sur l'utilisation du SIR pour évaluer les degrés d'équivalence entre les laboratoires.

G. Ratel s'est rendu à Lausanne (Suisse), le 18 juin 1999, pour une présentation sur « Le système international de référence (SIR) et son extension : un outil essentiel pour définir le degré d'équivalence ».

#### 7.4 Activités en liaison avec des organisations extérieures

P.J. Allisy-Roberts est membre du British Committee for Radiation Units (BCRU). Elle est membre de l'U.K. Department of Trade and Industry Measurement Advisory Committee (MAC) et membre scientifique de l'U.K. Health and Safety Commission's Ionizing Radiations Advisory Committee (IRAC). Elle représente le BIPM au SSDL Scientific Advisory Committee de l'AIEA, et est membre du Comité de rédaction du *Journal of Radiological Protection*.

D.T. Burns est consultant scientifique pour le programme de coordination des recherches de l'AIEA dans le cadre de la mise en œuvre de la rédaction d'un code de pratique pour la dosimétrie en radiothérapie. Il représente le BIPM aux réunions de l'ICRU et aux réunions des personnes chargées des relations dans le domaine des rayonnements ionisants au sein de l'EUROMET. Il est conseiller de *Physics in Medicine and Biology* et de *Medical Physics*.

G. Ratel représente le BIPM à l'ICRM.

#### 7.5 Activités liées au travail des Comités consultatifs

P.J. Allisy-Roberts est secrétaire exécutive du CCRI et du CCAUV. Elle est membre, avec D.T. Burns, des groupes de travail de la Section I du CCRI sur les comparaisons clés et sur les facteurs de correction pour le kerma dans l'air pour les chambres à cavité. G. Ratel est membre des groupes de travail de la Section II du CCRI sur l'extension du SIR aux émetteurs de rayonnement bêta, sur l'analyse systématique du SIR, sur l'équivalence des étalons, et sur les comparaisons de  $^{204}\text{Tl}$  et de  $^{192}\text{Ir}$ . C. Michotte représente le BIPM au Groupe de travail 1 du Comité commun pour les guides en métrologie.

#### 7.6 Visiteurs de la section des rayonnements ionisants

- M. H. Servière (IPSN), le 1<sup>er</sup> octobre 1999.
- M. M. Vijayam (BARC), du 16 au 23 octobre 1999.
- M. A. Brosed (CIEMAT), du 22 au 29 octobre 1999.
- Mlle E. Leblanc et M. P. Cassette (BNM-LNHB), le 27 octobre 1999.
- M. R. Huntley (ARPANSA), les 29 et 30 novembre 1999.
- MM. E. van Dijk et M. Pieksma (NMI), du 10 au 18 janvier 2000.
- Mme A. Doğan (Turquie), le 24 janvier 2000.
- M. G. Walwyn Salas (Cuba), le 24 mai 2000.

- MM. M. Mollin et G. Le Roy (BNM-LCIE), le 24 mai 2000.
- M. N. Takata (ETL), les 12 et 13 juin 2000.

## **8 LA BASE DE DONNÉES DU BIPM SUR LES COMPARAISONS CLÉS (C. THOMAS)**

### **8.1 Activités liées à la base de données du BIPM sur les comparaisons clés (C. Thomas et L. Le Mée)**

La base de données du BIPM sur les comparaisons clés a été officiellement mise à disposition du public le 30 novembre 1999 par l'intermédiaire de l'Internet, et peut être consultée sur le site Web du BIPM à l'adresse <http://www.bipm.org>. Cette base de données résulte d'une collaboration étroite entre le NIST et le BIPM débutée voilà plusieurs années, et, le même jour, M. R.L. Watters et ses collaborateurs (NIST, Gaithersburg, États-Unis) ouvrirent sur le site Web du NIST une base de données identique, dans sa structure et son contenu, à la base de données du BIPM sur les comparaisons clés. La base de données du NIST est appelée "International Comparisons DataBase (ICDB)".

À cette date, la base de données du BIPM n'était qu'une réplique de la base de données du NIST. D'un point de vue technique, ceci impliquait qu'il était possible d'en changer le contenu, mais pas la structure. Assez rapidement, le BIPM se rendit compte que l'apport de nouvelles informations ou de modifications à sa base de données demandait des interventions plutôt laborieuses. Il en résulta que, quelques mois plus tard, le NIST fit le don généreux au BIPM de la base de données dite « maîtresse », dont les deux bases de données du BIPM et du NIST sont issues. La base de données maîtresse ne contenait à l'époque, et jusqu'au début du mois de juin 2000, que la liste des comparaisons clés et supplémentaires décidées par les Comités consultatifs, ainsi qu'un petit nombre des comparaisons clés correspondantes mises en œuvre par les organisations régionales de métrologie. Autrement dit, son contenu correspondait à l'annexe D de l'arrangement de reconnaissance mutuelle. Pour toutes les comparaisons de la liste, un certain nombre de renseignements sont donnés : l'identifiant de la comparaison, sa description, le mesurande et sa valeur approximative, l'état de déroulement de la comparaison, les années de début et de fin des mesures,

éventuellement les instruments voyageurs, le laboratoire qui pilote la comparaison, le nom et l'adresse de la personne qui la coordonne, et la liste des laboratoires qui y participent.

Le fait d'avoir accès à la base de données maîtresse a permis au BIPM d'organiser le travail comme suit. Trois bases de données y ont été, et y sont encore, implantées :

- la base de données du BIPM sur les comparaisons clés, ou base de données de production, accessible par l'Internet ;
- la base de données de pré-production (pas accessible au public), identique à la base de données de production quant à sa structure, mais légèrement différente quant à son contenu, puisqu'elle intègre les modifications ou additions à la base de données de production dès que celles-ci sont connues ; et
- la base de données prototype (pas accessible au public), qui est utilisée pour faire des essais quand des modifications importantes, tant de structure que de contenu, sont nécessaires.

Les modifications et additions apportées à la base de données de pré-production sont nommées « petites corrections ». Il s'agit principalement de corrections telles que des fautes d'orthographe, des rectifications dans les listes des laboratoires participant aux comparaisons ou dans les informations données sur les adresses postales et électroniques des coordinateurs, etc. Pendant les réunions des Comités consultatifs et des groupes de travail des Comités consultatifs, il se peut que de nouvelles comparaisons clés et supplémentaires (éventuellement régionales) soient décidées ou que certaines informations concernant les comparaisons existantes soient rectifiées. Tout cela constitue l'ensemble des petites corrections. Une fois qu'un nombre suffisamment important de petites corrections est entré dans la base de données de pré-production et qu'elles ont été toutes soigneusement vérifiées, nous ouvrons la base de données de pré-production sur le Web, si bien qu'elle devient la base de données de production révisée à une date donnée. De telles révisions ont lieu à peu près chaque deux semaines. À l'heure actuelle, il n'existe pas de mécanisme pour synchroniser de manière automatique les révisions aux bases de données du BIPM et du NIST. Donc, pour conserver ces deux bases de données à l'identique, il faut que le NIST soit informé de manière fiable des petites corrections apportées par le BIPM à sa base de données de pré-production. Ceci est réalisé par l'envoi régulier de messages électroniques du BIPM au NIST. Les petites corrections sont alors entrées par le NIST dans sa base à la date de son choix et quelquefois d'une manière un peu différente de celle utilisée au BIPM. Il s'ensuit que les bases de données

du BIPM et du NIST n'ont plus jamais été aussi strictement identiques qu'elles l'étaient le 30 novembre 1999. Cependant, on consacre d'importants efforts à vérifier qu'elles ne contiennent jamais d'informations contradictoires.

La base de données prototype du BIPM est devenue un outil très utile en avril 2000, lorsque les résultats des toutes premières comparaisons approuvées par des Comités consultatifs furent disponibles. Les résultats sont extraits du rapport final de la comparaison et mis en forme afin de les présenter d'une manière uniforme. Pour cela, ils sont entrés dans un fichier Excel, dont le format a été mis au point petit à petit durant plusieurs mois, puis accepté par le CCQM lors de sa 6<sup>e</sup> session au début d'avril 2000. Le fichier Excel de résultats d'une (sous) comparaison comprend :

- les mesures individuelles effectuées par les laboratoires, ainsi que leur incertitude-type composée ;
- les déclarations d'équivalence données sous la forme d'un ensemble de phrases et d'équations qui expliquent comment est choisie la valeur de référence de la (sous) comparaison, et donnant sa valeur et l'incertitude-type composée associée, et aussi comment les degrés d'équivalence (écarts et incertitudes associées étendues au niveau de confiance de 95 %) sont calculés ;
- la matrice d'équivalence qui rassemble les degrés d'équivalence de tous les laboratoires participants, par rapport à la valeur de référence et entre eux ; et enfin
- tous les graphes d'intérêt.

Les fichiers Excel des résultats des sept sous-comparaisons de mélanges de gaz, CCQM-K1.a à 1.g, résultats approuvés lors de la 5<sup>e</sup> session du CCQM en février 1999, étaient prêts à la fin du mois d'avril 2000. Au début du mois de juin 2000, des fichiers du même type étaient en cours de réalisation pour les comparaisons CCPR-K3.a, CCPR-K3.b et CCPR-K4, toutes les trois appartenant au domaine de la photométrie et dont les résultats avaient été approuvés lors de la 15<sup>e</sup> session du CCPR en mars 1999. On a traité de la même manière les résultats d'un certain nombre d'autres comparaisons clés ou supplémentaires, tout particulièrement celles du BIPM qui sont continues, afin de vérifier que le format défini pour le fichier Excel peut leur convenir, et aussi afin de les préparer pour leur présentation et approbation lors des prochaines réunions des Comités consultatifs appropriés.

Élaborer un format de fichier Excel applicable aux résultats de n'importe laquelle des comparaisons sans modification majeure fut un travail laborieux,

mais qui se révéla de la plus haute importance pour l'unification de la base de données du BIPM sur les comparaisons clés. En effet, il s'avéra que l'on pouvait aisément utiliser ces fichiers Excel de résultats pour la réalisation de pages en hypertexte qui peuvent être ajoutées à la base de données prototype afin de composer l'annexe B de l'arrangement de reconnaissance mutuelle. Le 29 mai 2000, la base de données prototype incluait ces pages pour les sept sous-comparaisons CCQM-K1. Le 5 juin 2000, le président du CCQM autorisa formellement le BIPM à rendre ces résultats publics et la base de données prototype fut lancée sur le Web le jour suivant, 6 juin 2000, devenant ainsi la nouvelle base de données de production. Depuis cette date, on a donc accès à des résultats de comparaisons clés par l'intermédiaire du site Web du BIPM. Le 1<sup>er</sup> juillet 2000, la base de données du BIPM sur les comparaisons clés rendait publics les résultats des comparaisons CCQM-K1, CCQM-K2 et CCPR-S3, les pages en hypertexte correspondant aux résultats des comparaisons de photométrie citées plus haut devraient être prêtes à l'automne 2000.

Quelques remarques pour terminer à propos de l'annexe B de l'arrangement de reconnaissance mutuelle comme elle apparaît dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés : ainsi qu'il a été mentionné plus haut, elle prend la forme de pages écrites en hypertexte tout particulièrement conçues pour le Web. Ces pages sont simples, courtes, colorées et séduisantes pour l'utilisateur habitué à naviguer sur l'Internet. De plus, les résultats des comparaisons y sont reproduits en toute sécurité parce que ces pages sont composées d'images statiques, elles-mêmes fabriquées directement à partir des fichiers Excel de résultats, sans qu'aucun calcul ne soit refait. La conception et la réalisation de ces pages sont dues au BIPM, mais il s'agit d'un travail réalisé en étroite collaboration avec R.L. Watters qui a bénéficié d'un accès privilégié à notre base de données prototype tout au long de son élaboration.

Les activités liées à la base de données du BIPM sur les comparaisons clés ne concernent pas seulement les annexes B et D de l'arrangement, mais aussi son annexe C : les aptitudes en matière d'étalonnage et de mesurage des laboratoires nationaux de métrologie. Ces aptitudes sont établies de manière interne dans les organisations régionales de métrologie et présentées sous la forme de fichiers électroniques dont le format est parfaitement défini. Le Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM a décidé d'une procédure de revue et d'acceptation du contenu de ces fichiers parmi les régions. Le BIPM y joue un rôle pivot dans le sens qu'il s'assure que les versions successives des fichiers d'aptitudes reçues des organisations

régionales sont soigneusement conservées, puis analysées d'un point de vue éditorial (en aucun cas en termes de jugement du contenu) et redistribuées aux organisations régionales. Au BIPM, nous prenons grand soin d'archiver ces fichiers et nous gravons sur des disques compacts, à l'occasion de chaque réunion du Comité mixte (tous les six mois), l'information la plus récente et la plus complète dont nous disposons quelques jours avant la réunion. Les disques compacts produits au BIPM sont distribués pendant les réunions du Comité mixte et sont aussi disponibles sur demande. Cette technique, qui gèle l'information à une date donnée et qui permet de la distribuer sous la forme d'un objet physique, fut très bien accueillie lors de la 4<sup>e</sup> réunion du Comité mixte tenue en mars 2000 au NIST.

Les fichiers d'aptitudes de tous les laboratoires sont déjà presque prêts dans les domaines des longueurs et de l'électricité et du magnétisme. Le BIPM travaille maintenant à la conception de la partie de la base de données qui est appelée à contenir l'annexe C de l'arrangement. Ce travail inclut la mise au point d'une procédure de recherche compliquée qui doit aider l'utilisateur à trouver facilement les laboratoires proposant le service particulier dont il a besoin. Nous espérons être en mesure de présenter cette base de données prototype lors de la réunion des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie, prévue pour le 18 octobre 2000, afin de la rendre publique par l'intermédiaire du Web avant la fin de l'année 2000. Clairement, elle ne contiendra alors que les aptitudes relatives aux deux domaines de métrologie déjà cités : longueurs, et électricité et magnétisme, mais de nouvelles informations viendront s'y ajouter plus tard. Le domaine de la chimie mérite d'être cité ici, car il constitue un cas spécial qui nécessitera un travail supplémentaire des concepteurs de la base de données.

Au 1<sup>er</sup> juillet 2000, environ 330 comparaisons clés ou supplémentaires, conduites sous les auspices du CIPM ou des organisations régionales de métrologie, étaient recensées ; au 15 juin 2000, environ 180 fichiers d'aptitudes en matière d'étalonnage et de mesurage des laboratoires nationaux étaient stockés ; la base de données fait l'objet d'une moyenne de 5 connections, soit environ 300 clics, chaque jour ouvrable sur le site Web du BIPM.

## 8.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

C. Thomas s'est rendue :

- à Paris (France), le 14 octobre 1999, pour présenter la base de données du BIPM sur les comparaisons clés lors d'une réunion des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie.
- au NPL, Teddington (Royaume Uni), les 11 et 12 novembre 1999, pour assister au NPL Workshop on Statistical Analysis of Interlaboratory Comparisons.
- au NIST, Gaithersburg (États-Unis), du 6 au 10 décembre 1999, accompagnée par L. Le Mée, pour discuter de la base de données avec R.L. Watters et les membres de son équipe.
- au NIST, Gaithersburg (États-Unis), les 20 et 21 mars 2000, pour présenter la situation de l'annexe C de l'arrangement (aptitudes en matière d'étalonnage et de mesurage des laboratoires nationaux de métrologie) lors de la 4<sup>e</sup> réunion du Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM, et pour discuter de la base de données (le 22 mars 2000) avec MM. R.L. Watters et W.D. Camara.

## 8.3 Activités liées au travail Comités consultatifs

C. Thomas a assisté à :

- la réunion du Groupe de travail du CCQM sur les incertitudes, les 1<sup>er</sup> et 2 décembre 1999 ;
- la réunion du Groupe de travail du CCQM sur l'analyse des mélanges gazeux, les 3 et 4 avril 2000 ;
- la 6<sup>e</sup> session du CCQM, les 6 et 7 avril 2000 ;
- la réunion du Groupe de travail du CCT sur les comparaisons clés, le 11 avril 2000 ;
- la 20<sup>e</sup> session du CCT, du 12 au 14 avril 2000.

Elle y a présenté la base de données du BIPM sur les comparaisons clés.

## 8.4 Visiteurs

- M. K. Berry (NPL), le 27 janvier 2000.
- M. L. Érard (BNM-LCIE), le 31 mai 2000.

## 9 PUBLICATIONS DU BIPM (P.W. MARTIN)

### 9.1 Rapports du CIPM et des Comités consultatifs

(P.W. Martin, J.R. Miles et C. Thomas ; D. Le Coz)

Depuis octobre 1999 les rapports suivants ont été publiés :

- *Procès-verbaux des séances du Comité international des poids et mesures*, 88<sup>e</sup> session (1999), 2000, **67**, 311 p.
- *Comité consultatif de photométrie et radiométrie*, 15<sup>e</sup> session (1999), 2000, 86 p.
- *Comité consultatif du temps et des fréquences*, 14<sup>e</sup> session (1999), 2000, 137 p.
- *Supplément 2000 : additions et corrections à la 7<sup>e</sup> édition (1998) de la brochure sur le SI*, juin 2000, 9 p.

Note : toutes les publications scientifiques figurent dans les sections appropriées du rapport.

### 9.2 Metrologia

(P.W. Martin et J.R. Miles ; D. Saillard et C. Veyradier)

Le volume **36** de *Metrologia* a été publié en 1999 ; il comprend quatre numéros normaux et deux numéros spéciaux. Ces derniers, consacrés aux meilleures mesures du domaine, ont été très appréciés et sont rapidement devenus des sources de référence utiles aux chercheurs. Le premier de ces numéros spéciaux, le n° 4 du volume **37** de *Metrologia*, contient une série d'articles sur les mesures acoustiques dans l'air, les vibrations et les chocs, les ultrasons, et les mesures acoustiques dans l'eau. Le second, le n° 6, publie les comptes rendus de la 3<sup>e</sup> « International conference on pressure metrology from ultra-high vacuum to very high pressures ( $10^{-7}$  Pa to  $10^9$  Pa) » du CCM. Pour les futurs numéros consacrés aux comptes rendus de conférences, des fichiers Word et LaTeX seront disponibles sur les pages *Metrologia* du serveur Internet du BIPM.

### 9.3 Serveur Internet du BIPM (J.R. Miles et L. Le Mée)

Le serveur Internet du BIPM (<http://www.bipm.org>) continue à se développer et fait maintenant l'objet d'environ 300 connections par jour. Les pages les plus populaires sont la nouvelle rubrique sur les comparaisons clés, qui donne

accès à la base de données du BIPM sur les comparaisons clés, l'horloge en ligne donnant l'heure UTC et TAI, la liste de liens utiles vers d'autres sites, et les pages d'information sur le SI et les divers comités de la Convention du Mètre. Les résolutions adoptées par la 21<sup>e</sup> Conférence générale sont aussi disponibles sous forme électronique.

## 10 RÉUNIONS ET EXPOSÉS AU BIPM

### 10.1 Réunions

- Le Groupe de travail sur la comparaison de  $^{204}\text{Tl}$  de la Section II du CCRI s'est réuni les 10 et 11 février 2000.
- Le Groupe de travail 1 (GUM) du Comité commun pour les guides en métrologie s'est réuni les 7 et 8 mars 2000, et le Groupe de travail 2 (VIM) s'est réuni les 9 et 10 mars.
- Un symposium sur les méthodes primaires de mesure en chimie s'est réuni les 4 et 5 avril 2000.
- Le CCQM s'est réuni les 6 et 7 avril 2000.
- Le CCT s'est réuni les 12, 13 et 14 avril 2000, il a été précédé d'une réunion de son Groupe de travail 3 sur l'équivalence le 11 avril.

### 10.2 Exposés

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

- E. Leblanc (CEA/DAMRI/LNHB, Saclay) : Application des détecteurs cryogéniques à la métrologie des rayonnements ionisants, le 27 octobre 1999.
- R. Huntley (ARPANSA, Melbourne) : Australian radiation dosimetry standards and their dissemination, le 30 novembre 1999.
- G. Mana (IMGC, Turin) : Science and technology in precision measurements, the determination of the Avogadro constant, le 2 février 2000.
- V.A. Brumberg (Inst. Appl. Astron., Saint-Petersbourg) : Fundamental astronomy concepts and constants in general relativity, le 1<sup>er</sup> mars 2000.

- Y. Millerioux (BNM-INM/CNAM, Paris) : Lasers asservis, références de longueurs d'ondes ou de fréquences, le 7 juin 2000.

## 11 CERTIFICATS ET NOTES D'ÉTUDE

Du 1<sup>er</sup> octobre 1999 au 30 juin 2000, 56 Certificats et 5 Notes d'étude ont été délivrés.

### 11.1 Certificats

1999

N<sup>os</sup>

36.	Ionization chamber, NE 2561-156 .....	Centro Regional de Referencia para la Dosimetrie (CRRD), Buenos Aires, Argentina.
37.	Ionization chamber, NE 2611A-133 .....	Id.
38.	Ionization chamber, NE 2575-467 .....	Id.
39.	Ionization chamber, NE 2571-1692 .....	Bhabha Atomic Research Centre (BARC), Mumbai, India.
40.	Ionization chamber, NE 2577-222 .....	Id.
41.	1 $\Omega$ resistance standard, No. 76088*.....	National Centre of Metrology (NCM), Sofia, Bulgaria.
42.	1 $\Omega$ resistance standard, No. 224907*.....	Id.
43.	1 $\Omega$ resistance standard, No. 470205*.....	Id.

---

\* Les étalons marqués d'un astérisque ont déjà été étalonnés au BIPM.

- |     |  |  |
|-----|--|--|
| 44. | 10 000 $\Omega$ resistance standard,<br>No. 527 .....                      | National Centre of Metrology<br>(NCM), Sofia, Bulgaria.  |
| 45. | 10 000 $\Omega$ resistance standard,<br>No. J 203 07 91 30104* .....       | Danish Institute of Fundamental<br>Metrology (DFM), Lyngby,<br>Denmark.  |
| 46. | 10 000 $\Omega$ resistance standard,<br>No. 43007* .....                   | Instituto Nacional de Metrologia,<br>Normalizaçao e Qualidade Industrial<br>(INMETRO), Rio de Janeiro, Brazil. |
| 47. | 1 $\Omega$ resistance standard,<br>No. 1883427* .....                      | Id.  |
| 48. | 1 $\Omega$ resistance standard,<br>No. 1711458* .....                      | Id.  |
| 49. | Étalon de résistance de 1 $\Omega$ ,<br>n° 17103* .....                    | Institut national de métrologie (INM),<br>Bucarest, Roumanie.  |
| 50. | Étalon de résistance de 1 $\Omega$ ,<br>n°17112* .....                     | Id.  |
| 51. | Étalon de résistance de<br>10 000 $\Omega$ ,<br>n° 5885009* .....          | Id.  |
| 52. | Étalon de résistance de<br>10 000 $\Omega$ ,<br>n° 5885010* .....          | Id.  |
| 53. | Étalon de force électromotrice<br>à diode de Zener,<br>n° 594 0003* .....  | Id.  |
| 54. | 1 $\Omega$ resistance standard,<br>No. 470461* .....                       | National Centre of Metrology<br>(NCM), Sofia, Bulgaria.  |
| 55. | Étalon de force électromotrice<br>à diode de Zener,<br>n° 5 740 201* ..... | Service de la métrologie belge<br>(IGM), Bruxelles,<br>Belgique.   |

## 2000

N <sup>os</sup>		
1.	10 pF capacitance standard, No. 01016 .....	Nederlands Meetinstituut, Van Swinden Laboratorium (NMI-VSL), Delft, The Netherlands.
2.	10 pF capacitance standard, No. 01017 .....	Id.
3.	100 pF capacitance standard, No. 01215 .....	Id.
4.	100 pF capacitance standard, No. 01216 .....	Nederlands Meetinstituut, Van Swinden Laboratorium (NMI-VSL), Delft, The Netherlands.
5.	Étalon de capacité de 10 pF, n° 1047 .....	Laboratoire central des industries électriques (BNM-LCIE), Fontenay-aux-Roses, France.
6.	Étalon de capacité de 100 pF, n° 1045 .....	Id.
7.	Prototype de masse n° 67 .....	République tchèque.
8.	Prototype de masse n° 76* .....	Italie.
9.	1 kg mass standard in stainless steel, NSCCL .....	Center of Studies, Measurement and Quality Certification (CESMEC), Santiago, Chile.
10.	Ionization chamber, Shonka 413 .....	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Madrid, Spain.
11.	Ionization chamber, Shonka 346 .....	Id.
12.	Étalon de force électromotrice à diode de Zener, n° 616 0009* .....	Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (INETI), Lisbonne, Portugal.
13.	10 pF capacitance standard, No. 01278 .....	Id.
14.	Étalon de résistance de 1 $\Omega$ , n° 1799595 .....	Id.

- |     |  |  |
|-----|--|--|
| 15. | Five luminous flux standards (2800 K)*,<br>Nos. TA21531C, TA21533C, TA21535C, TA21537C, TA21539C ..... | Central Office of Measures (GUM), Warsaw, Poland.  |
| 16. | Five luminous intensity standards (2800 K)*,<br>Nos. SB20490, SB20491, SB20492, SB20493, SB20494 ..... | Id.  |
| 17. | Four luminous flux standards (2800 K),<br>Nos. 406*, 407*, 410*, 412 ..                                | Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), Wien, Austria.                               |
| 18. | Three luminous intensity standards (2800 K),<br>Nos. 122, 128, 129 .....                               | National Physical Laboratory of India (NPLI), New Delhi, India.                              |
| 19. | 1 kg mass standard in stainless steel,<br>Mettler-S* .....   | Measurement Standard Laboratory, Industrial Research Ltd (MSL-IRL), Lower Hutt, New Zealand. |
| 20. | 1 kg mass standard in stainless steel,<br>No. 2188* .....  | Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), Montevideo, Uruguay.                             |
| 21. | Prototype de masse n° 4* ...   | États-Unis d'Amérique.   |
| 22. | Prototype de masse n° 20* ...  | Id.  |
| 23. | 1 kg mass standard in stainless steel,<br>K30* .....   | Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Buenos Aires, Argentina.                 |
| 24. | 1 kg mass standard in stainless steel,<br>No. 48* .....  | Id.  |
| 25. | 1 kg mass standard in stainless steel,<br>MP3* .....   | Centro Español de Metrología (CEM), Madrid, Spain.   |
| 26. | 10 pF capacitance standard,<br>No. 01181* .....  | Czech Metrological Institute (CMI), Prague, Czech Rep.                                       |

27.	10 pF capacitance standard, No. K12* .....	Czech Metrological Institute (CMI), Prague, Czech Rep.
28.	10 pF capacitance standard, No. K15* .....	Id.
29.	Étalon de capacité de 10 pF, n° 01277 .....	Service de la métrologie belge (IGM), Bruxelles, Belgique.
30.	Étalon de capacité de 100 pF, n° 01276 .....	Id.
31.	Étalon de capacité de 100 pF, n° 01283 .....	Id.
32.	Étalon de capacité de 100 pF, n° 01288 .....	Id.
33.	Three luminous intensity standards (2800 K)*, Nos. 511, 512, 2/88 .....	Elektrotechnický Zkušební Ústav (EZU), Prague, Czech Rep.
34.	Eight luminous flux standards (2800 K)*, Nos. 511, 512, 40511, 40512, 40513, 100391, 100392, 100393 .....	Id.
35.	Six luminous flux standards (2800 K)*, Nos. 77A, 77C, 14, E1, E2, E3 .....	Id.
36.	Four colour temperature standards*, Nos. 2717, 2726, 477, 951 ....	Id.

**11.2 Notes d'étude****1999**

N°

- |    |  |   |
|----|--|---|
| 1. | 10 000 $\Omega$ resistance standard,<br>No. 197896 ..... | National Centre of Metrology<br>(NCM), Sofia, Bulgaria. |
| 2. | 10 000 $\Omega$ resistance standard,<br>No. 116002 ..... | Id.   |

**2000**

N°

- |    |   |   |
|----|---|---|
| 1. | Three luminous flux standards<br>(2800 K),<br>Nos. 210, 211, 212 .....      | National Physical Laboratory<br>of India (NPLI), New Delhi,<br>India. |
| 2. | Three luminous intensity standards<br>(2600 K),<br>Nos. 122, 128, 129 ..... | Id.   |
| 3. | Water triple-point cell,<br>No. 052 .....                                   | Ulusal Metroloji Enstitüsü<br>(UME), Gebze-Kocaeli, Turkey.           |

## 12 GESTION DU BIPM

### 12.1 Comptes

Les tableaux suivants sont la reproduction des tableaux qui figurent dans le *Rapport annuel aux Gouvernements des Hautes parties contractantes sur la situation administrative et financière du Bureau international des poids et mesures* relatif à l'exercice 1999.

#### 12.1.1 Compte I : fonds ordinaires\*

Actif au 1 <sup>er</sup> janvier 1999		<b>18 494 175,33</b>
<b>Recettes</b>		
Recettes budgétaires		30 615 516,32
Taxes sur les achats remboursées		1 353 078,38
Réévaluation de l'actif au 31 décembre 1999		756 041,86
Total des recettes		<b>32 724 636,56</b>
<b>Dépenses</b>		
Dépenses budgétaires		27 279 589,69
Différences de change		49 544,76
Taxes sur les achats remboursables		1 146 911,64
Total des dépenses		<b>28 476 046,09</b>
Actif au 31 décembre 1999		<b>22 742 765,80</b>
<b>Détail des recettes budgétaires</b>		
Versement de contributions :		
Au titre de l'exercice 1999	24 742 254	} 29 088 819,00
Au titre de l'exercice 1998	3 254 893	
Au titre de l'exercice 1997	0	
Au titre de l'exercice 1996 et antérieurs	496 545	
Au titre de l'exercice 2000	595 127	
Intérêts des fonds		1 192 582,98
Recettes diverses		} 334 114,34
• cession de prototypes (kg)	24 973,77	
• divers	309 140,57	
Total des recettes budgétaires		<b>30 615 516,32</b>

*Dépenses du Compte I.* — Les dépenses budgétaires en 1999 se sont élevées à 27 279 589,69 francs-or pour un budget voté s'élevant à 31 363 000 francs-or.

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

**Détail des dépenses budgétaires**

Chapitres	Dépenses de l'exercice	Budget voté	Économies	Dépassements
<i>A. Dépenses de personnel :</i>				
1. Traitements	11 795 586,22	11 951 000	155 413,78	–
2. Allocations familiales et sociales	2 273 053,83	2 374 000	100 946,17	–
3. Assurance maladie (a)	1 143 067,15	1 139 000	–	4 067,15
4. Assurance accidents	44 584,86	46 000	1 415,14	–
5. Caisse de retraite (b)	3 048 000,00	3 048 000	–	–
<i>B. Dépenses de fonctionnement :</i>				
1. Laboratoires et atelier	930 218,09	1 200 000	269 781,91	–
2. Chauffage, eau, électricité	390 339,86	470 000	79 660,14	–
3. Assurances	75 836,03	82 000	6 163,97	–
4. Publications	246 953,34	273 000	26 046,66	–
5. Frais de bureau	508 992,07	570 000	61 007,93	–
6. Voyages et transports de matériel	1 041 732,91	1 018 000	–	23 732,91
7. Entretien courant	481 230,54	556 000	74 769,46	–
8. Bibliothèque	429 162,51	368 000	–	61 162,51
9. Bureau du Comité	42 832,27	99 000	56 167,73	–
<i>C. Dépenses d'investissement :</i>	3 589 688,95	4 411 000	821 311,05	–
<i>D. Dépenses de bâtiments</i> (gros travaux d'entretien et de rénovation) :	746 587,19	2 836 000	2 089 412,81	–
<i>E. Frais divers et imprévus (c) (d) :</i>	491 723,87	922 000	430 276,13	–
<b>Totaux</b>	<b>27 279 589,69</b>	<b>31 363 000</b>	<b>4 172 372,88</b>	<b>88 962,57</b>

(a) Comprenant un virement de 296 696 francs-or au Compte II (Caisse de retraite).

(b) Virement au Compte II (Caisse de retraite).

(c) Comprenant un virement de 15 324 francs-or au Compte IV (Caisse de prêts sociaux).

(d) Comprenant un virement de 277 352,62 francs-or au Compte VI (Metrologia).

## 12.1.2 Compte II : caisse de retraite

---

Actif au 1 <sup>er</sup> janvier 1999	27 359 350,60
<b>Recettes</b>	
Retenues sur les traitements	1 072 790,82
Virement du Compte I *	3 393 358,87
Intérêts des fonds	1 519 365,72
Réévaluation de l'actif au 31 décembre 1999	967 060,03
Total des recettes	6 952 575,44
<b>Dépenses</b>	
Pensions servies	5 159 835,72
Remboursement de cotisations	26 852,58
Capital-décès versé	34 662,05
Total des dépenses	5 221 350,35
Actif au 31 décembre 1999	29 090 575,69

---

\* Comprenant un virement de 296 696 francs-or provenant des économies réalisées sur l'assurance maladie (*BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1994, 62, 19).

## 12.1.3 Compte III : fonds spécial pour l'amélioration du matériel scientifique

---

Actif au 1 <sup>er</sup> janvier 1999	114 069,27
<b>Dépenses</b>	
Réévaluation de l'actif au 31 décembre 1999	3 836,69
Total des dépenses	3 836,69
Actif au 31 décembre 1999	117 905,96

---

## 12.1.4 Compte IV : caisse de prêts sociaux

---

Actif au 1 <sup>er</sup> janvier 1999 hors créances	<b>348 325,05</b>
<b>Recettes</b>	
Amortissements partiels des prêts :	
Capital	153 429,73
Intérêts	5 268,48
Virement du Compte I	15 324,00
Intérêts des fonds	16 888,05
Total des recettes	<b>190 910,26</b>
<b>Dépenses</b>	
Prêts consentis en cours d'année	225 293,74
Total des dépenses	<b>225 293,74</b>
Actif au 31 décembre 1999 hors créances	<b>313 941,57</b>
<b>Créances de la caisse de prêts sociaux</b>	
Créances au 1 <sup>er</sup> janvier 1999	243 126,41
Créances nouvelles en cours d'année	225 293,74
Amortissements partiels des prêts (capital)	-153 429,73
Créances au 31 décembre 1999	<b>314 990,42</b>
Actif au 31 décembre 1999 créances incluses	<b>628 931,99</b>

---

## 12.1.5 Compte V : réserve pour les bâtiments

---

Actif au 1 <sup>er</sup> janvier 1999	<b>9 383 731,19</b>
<b>Recettes</b>	
Intérêts des fonds	500 099,75
Réévaluation de l'actif au 31 décembre 1999	334 218,67
Total des recettes	<b>834 318,42</b>
<b>Dépenses</b>	
Dépenses Pavillon du Mail	166 403,71
Total des dépenses	<b>166 403,71</b>
Actif au 31 décembre 1999	<b>10 051 645,90</b>

---

## 12.1.6 Compte VI : Metrologia

---

**Recettes**

Abonnements encaissés	446 152,11
Virement du Compte I	277 352,62
Total des recettes	<b>723 504,73</b>

**Dépenses**

Dépenses de fonctionnement	713 039,15
Dépenses d'investissement	10 465,58
Total des dépenses	<b>723 504,73</b>

---

## 12.1.7 Compte VII : fonds de réserve pour l'assurance maladie

---

Actif au 1 <sup>er</sup> janvier 1999	<b>1 966 053,11</b>
---------------------------------------	---------------------

**Recettes**

Intérêts des fonds	104 540,97
Réévaluation de l'actif au 31 décembre 1999	70 339,39
Total des recettes	<b>174 880,36</b>

**Dépenses**

Subvention des cotisations des retraités	27 283,11
Total des dépenses	<b>27 283,11</b>

Actif au 31 décembre 1999	<b>2 113 650,36</b>
---------------------------	---------------------

---

## 12.1.8 Bilan au 31 décembre 1999

Compte I	« Fonds ordinaires »	22 742 765,80
Compte II	« Caisse de retraite »	29 090 575,69
Compte III	« Fonds spécial pour l'amélioration du matériel scientifique »	117 905,96
Compte IV	« Caisse de prêts sociaux »	628 931,99
Compte V	« Réserve pour les bâtiments »	10 051 645,90
Compte VI	« Metrologia »	0,00
Compte VII	« Fonds de réserve pour l'assurance maladie »	2 113 650,36
Actif net		<b>64 745 475,70</b>
Cet actif net se décompose comme suit :		
<i>a. Fonds déposés en banque :</i>		
1°	En francs français (1 FRF = 0,551 109 935 FO)	7 522 392,43
2°	En dollars américains (1,0046 USD = 1 EUR ; 1 USD = 3,598 491 140 FO)	12 608 879,70
3°	En francs suisses (1,6051 CHF = 1 EUR ; 1 CHF = 2,252 223 661 FO)	17 905,79
4°	En livres sterling (0,6217 GBP = 1 EUR ; 1 GBP = 5,814 772 718 FO)	2 309 017,52
5°	En Deutsche Marks (1,95 583 DEM = 1 EUR ; 1 DEM = 1,848 342 749 FO)	925 319,45
6°	En yens (102,73 JPY = 1 EUR ; 100 JPY = 3,518 976 150 FO)	436,35
7°	En forints (254,7 HUF = 1 EUR ; 1 HUF = 0,014 193 342 FO)	1 743,42
8°	En couronnes suédoises (8,5625 SEK = 1 EUR ; 1 SEK = 0,422 194 943 FO)	494 822,39
9°	En couronnes norvégiennes (8,0765 NOK = 1 EUR ; 1 NOK = 0,447 600 347 FO)	530 762,46
10°	En couronnes danoises (7,4433 DKK = 1 EUR ; 1 DKK = 0,485 677 616 FO)	10 175 243,18
11°	En liras italiennes (1 936,27 ITL = 1 EUR ; 1 000 ITL = 1,867 014 516 FO)	3 547 327,58
12°	En euros (1 EUR = 6,55 957 FRF = 3,615 044 199 FO)	27 930 765,66
	Total des fonds déposés en banque	<b>66 064 615,93</b>
<i>b. Espèces en caisse :</i>		
1°	En francs français (1 FRF = 0,551 109 935 FO)	19 833,92
2°	En dollars américains (1,0046 USD = 1 EUR ; 1 USD = 3,598 491 140 FO)	1 576,86
3°	En Deutsche Marks (1,95 583 DEM = 1 EUR ; 1 DEM = 1,848 342 749 FO)	447,11
4°	En livres sterling (0,6217 GBP = 1 EUR ; 1 GBP = 5,814 772 718 FO)	5 815,06
5°	En florins (2,20 371 NLG = 1 EUR ; 1 NLG = 1,640 435 538 FO)	57,42
6°	En dollars canadiens (1,4608 CND = 1 EUR ; 1 CND = 2,474 701 670 FO)	1 781,79
7°	En pesetas (166,386 ESP = 1 EUR ; 1 ESP = 0,021 726 853 FO)	792,09
8°	En escudos (200,482 PTE = 1 EUR ; 1 PTE = 0,018 031 764 FO)	88,89
9°	En dollars australiens (1,5422 AUD = 1 EUR ; 1 AUD = 2,344 082 609 FO)	745,42
10°	En schillings autrichiens (13,7603 ATS = 1 EUR ; 1 ATS = 0,262 715 508 FO)	473,44
	Total des espèces en caisse	<b>31 612,00</b>
	Actif brut ( <i>a + b</i> )	<b>66 096 227,93</b>
	<i>c. Créances de la Caisse de prêts sociaux</i>	314 990,42
	<i>d. Provision pour remboursement aux États à déduire (1)</i>	-1 520 251,00
	<i>e. Sommes reçues de l'ex-Yougoslavie à déduire</i>	-145 491,65
	Actif net	<b>64 745 475,70</b>
<i>(1) Compte « Remboursement aux États »</i>		
	Situation au 1 <sup>er</sup> janvier 1999	240 138,00
	Versement par l'Argentine de ses contributions de 1992 (solde), 1993, 1996, 1997, 1998 (acompte)	731 646,00
	Versement par le Chili de ses contributions de 1997 (solde), 1998 et 1999 (acompte)	406 642,00
	Versement par l'Uruguay de ses contributions de 1995 (solde) et 1997 (acompte)	141 825,00
	Situation au 31 décembre 1999	<b>1 520 251,00</b>

## 12.2 Personnel

### 12.2.1 Engagements

- M. Robert Wielgosz, né en 1971 à Londres (Royaume-Uni), de nationalité britannique, précédemment chercheur principal au National Physical Laboratory, Teddington (Royaume-Uni), a été engagé en qualité de *physicien* et de responsable de la section de chimie à dater du 1<sup>er</sup> mai 2000.
- M. Gerald Petitgand, né en 1979 à Metz (France), précédemment technicien dans une société privée, a été engagé en qualité de *technicien* dans la section de radiométrie à dater du 15 février 2000. Il sera chargé en particulier de la maintenance du parc d'ordinateurs personnels du BIPM et du réseau informatique interne.

### 12.2.2 Promotions et changements de grade

- M. Raymond Felder, *physicien* dans la section des longueurs, a été promu *physicien principal* à dater du 1<sup>er</sup> janvier 2000.
- M. Jean Hostache, *technicien principal* dans la section des masses, a été promu *technicien métrologiste* à dater du 1<sup>er</sup> janvier 2000.

### 12.2.3 Chercheurs associés

- M. Longsheng Ma, né en 1941 à Shanghai (Chine), de nationalité chinoise, précédemment professeur à l'East China Normal University of Shanghai (Chine) et chercheur invité au Joint Institute for Laboratory Astrophysics à Boulder (États-Unis), a été engagé en qualité de chercheur associé dans la section des longueurs à dater du 25 janvier 2000 pour une période d'un an.
- M. Zhiheng Jiang, chercheur associé dans la section du temps depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1998, a vu son contrat prolongé jusqu'au 31 décembre 2002.

### 12.2.4 Départ

- M. Daniel Bournaud, *technicien principal* dans la section d'électricité, a pris sa retraite le 31 décembre 1999, après 36 ans de services efficaces et dévoués.

## **12.3 Bâtiments**

### **12.3.1 Petit Pavillon**

- Réfection de l'étanchéité de la structure du bâtiment qui abrite le transformateur principal du BIPM.

### **12.3.2 Grand Pavillon**

- Peinture de la cantine du personnel.

### **12.3.3 Observatoire**

- Remplacement du système de conditionnement d'air dans cinq salles (4, 5, 104, 105, 13).

### **12.3.4 Bâtiment des rayonnements ionisants**

- Enlèvement de la chaudière et remplacement par des chauffages électriques.
- Remplacement du système de conditionnement d'air au sous-sol.
- Réfection de trois salles et installation d'un nouveau système de conditionnement d'air.
- Réfection de la salle destinée aux rayons x.
- Réfection de la salle d'informatique.
- Peinture du couloir.
- Réparation de la toiture après la tempête du 26 décembre 1999.
- Construction d'un muret en face du bâtiment pour atténuer l'effet de la diffusion des rayons  $\gamma$  émis par la nouvelle source.

### **12.3.5 Pavillon du Mail**

- Construction du bâtiment.

### **12.3.6 Autres bâtiments**

- Installation d'un système de sécurité par digicode dans tous les laboratoires.
- Remplacement du standard téléphonique.

### 12.3.7 Extérieurs et parc

- Abattage d'un certain nombre d'arbres dangereux et réparation de la barrière après la tempête du 26 décembre 1999.
- Remplacement partiel d'anciennes haies servant de clôture dans le jardin.

## LISTE DES SIGLES UTILISÉS DANS LE PRÉSENT VOLUME

### 1 Sigles des laboratoires, commissions et conférences

AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
AIG	Association internationale de géodésie
AMCTM	Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology Conference
ANSTO	Australian Nuclear Science and Technology Organisation, Menai (Australie)
APMP	Asia/Pacific Metrology Programme
ARPANSA	Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, Sydney et Melbourne (Australie)
BARC	Bhabha Atomic Research Centre, Trombay (Inde)
BCRU	British Committee on Radiation Units
BEMC	British Electromagnetic Measurements Conference
BEV	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Vienne (Autriche)
BIPM	Bureau international des poids et mesures
BNM	Bureau national de métrologie, Paris (France)
BNM-CNAM	Bureau national de métrologie, Conservatoire national des arts et métiers, 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-LNE	Bureau national de métrologie, Laboratoire national d'essais, Paris (France)
BNM-LNHB	(ex BNM-LPRI) Bureau national de métrologie, Laboratoire national Henri Becquerel, Gif-sur-Yvette (France)
BNM-LPRI*	Bureau national de métrologie, Laboratoire primaire des rayonnements ionisants, Saclay (France), <i>voir</i> BNM-LNHB
BNM-LPTF	Bureau national de métrologie, Laboratoire primaire du temps et des fréquences, Paris (France)

---

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

BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières, Paris (France)
CCAUV	Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations
CCDM*	Comité consultatif pour la définition du mètre, <i>voir</i> CCL
CCDS*	Comité consultatif pour la définition de la seconde, <i>voir</i> CCTF
CCE*	Comité consultatif d'électricité, <i>voir</i> CCEM
CCEM	(ex CCE) Comité consultatif d'électricité et magnétisme
CCEMRI*	Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants, <i>voir</i> CCRI
CCL	(ex CCDM) Comité consultatif des longueurs
CCM	Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées
CCPR	Comité consultatif de photométrie et radiométrie
CCQM	Comité consultatif pour la quantité de matière
CCRI	(ex CCEMRI) Comité consultatif des rayonnements ionisants
CCT	Comité consultatif de thermométrie
CCTF	(ex CCDS) Comité consultatif du temps et des fréquences
CCU	Comité consultatif des unités
CEA	Commissariat à l'énergie atomique, Saclay (France)
CEI	Commission électrotechnique internationale
CEM	Centro Español de Metrología, Madrid (Espagne)
CESMEC	Centre of Studies, Measurement and Quality Certification (Chili)
CGGTTS	Sous-groupe sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS et le GLONASS/CCDS Group on GPS Time Transfer Standards
CIE	Commission internationale de l'éclairage
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Madrid (Espagne)
CIPM	Comité international des poids et mesures
CMA/MIKES	Mittatekniikan Keskus/Centre for Metrology and Accreditation, Helsinki (Finlande)
CMC	Aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages/ Calibration and Measurement Capabilities
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)
CNAM	Conservatoire national des arts et métiers, Paris (France)
CNES	Centre national d'études spatiales, Toulouse (France)
CNRS	Centre national de la recherche scientifique, Paris (France)
CODATA	Committee on Data for Science and Technology
COPL	Centre d'optique, photonique et lasers, université Laval (Canada)
CPEM	Conference on Precision Electromagnetic Measurements
CRL	Communications Research Laboratory, Tokyo (Japon)
CRRD	Centro Regional de Referencia para la Dosimetria, Buenos Aires (Argentine)
CSAO	Shaanxi Astronomical Observatory, Lintong (Chine)
CSIRO-NML	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, National Measurement Laboratory, Lindfield (Australie)
DANOF	Département d'astronomie fondamentale de l'Observatoire de Paris, Paris (France)
EFTF	European Frequency and Time Forum
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
FCS	Frequency Control Symposium
GREX	Groupe de recherche du CNRS : gravitation et expériences (France)
GT-RF	Groupe de travail du CCEM pour les grandeurs aux radiofréquences
GUM	Główny Urząd Miar/Central Office of Measures, Varsovie (Pologne)
ICAG	International Conference of Absolute Gravimeters
ICRF	International Celestial Reference Frame
ICRM	International Committee for Radionuclide Metrology
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
IEE	Institution of Electrical Engineers, Londres (Royaume-Uni)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway NJ (États-Unis)

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 et médecine de laboratoire/International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine
IFIN	Institutul de Fizica si Inginerie Nucleara, Bucarest (Roumanie)
IGEX	International GLONASS Experiment
IGGOS	Integrated Global Geodetic Observing System Symposium
IGM	Inspection générale de la métrologie, Service de la métrologie, Bruxelles (Belgique)
IGS	International GPS Service for Geodynamics
IIR	Inspektorate for Ionizing Radiation, Prague (Rép. tchèque)
ILP	Institut de physique des lasers, Académie des sciences de Russie, Novosibirsk (Féd. de Russie)
IMGC	Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Turin (Italie)
INETI	Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, Lisbonne (Portugal)
INM*	Institut national de métrologie, Paris (France), <i>voir</i> BNM-INM
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, Rio de Janeiro (Brésil)
INMRI	Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti, Rome (Italie)
INMS	<i>voir</i> NRC-INMS
INTI	Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Buenos Aires (Argentine)
ION	Institute of Navigation, Alexandria VA (États-Unis)
IPGP	Institut de physique du Globe, Paris (France)
IPQ	Instituto Português da Qualidade, Lisbonne (Portugal)
IPSN	Institut de protection et de sûreté nucléaire du Commissariat à l'énergie atomique, Paris (France)
IRA	Institut de radiophysique appliquée, Lausanne (Suisse)
IRAC	U.K. Health and Safety Commission Ionizing Radiation Advisory Committee (Royaume-Uni)
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
IVS	International VLBI Service
JILA	Joint Institute for Laboratory Astrophysics, Boulder CO (États-Unis)
KRISS	Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon (Rép. de Corée)
LCIE*	Laboratoire central des industries électriques, Fontenay-aux-Roses (France), <i>voir</i> BNM-LCIE
LEP	Laboratoires d'électronique Philips, Limeil-Brévannes (France)
LNE*	Laboratoire national d'essais, Paris (France), <i>voir</i> BNM-LNE
LNHB*	Laboratoire national Henri Becquerel, Gif-sur-Yvette (France), <i>voir</i> BNM-LNHB
LNMRI	Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, Rio de Janeiro (Brésil)
LPRI*	Laboratoire primaire des rayonnements ionisants, Saclay (France), <i>voir</i> BNM-LPRI
LPTF*	Laboratoire primaire du temps et des fréquences, Paris (France), <i>voir</i> BNM-LPTF
LSDG	Laboratoire secondaire de dosimétrie, Gand (Belgique)
MAC	U.K. Department of Trade and Industry Measurement Advisory Committee (Royaume-Uni)
MENAMET	Organisation de métrologie des pays du Moyen-Orient
MIKES*	Mittatekniiikan Keskus, Helsinki (Finlande), <i>voir</i> CMA
MSL-IRL	Measurement Standards Laboratory of New Zealand, Lower Hutt (Nouvelle-Zélande)
NAC	National Accelerator Centre, Faure (Afrique du Sud)
NBS*	National Bureau of Standards (États-Unis), <i>voir</i> NIST
NCSL	National Conference of Standards Laboratories (États-Unis)
NEWRAD	New Developments and Applications in Optical Radiometry Conference
NIM	Institut national de métrologie, Beijing (Chine)
NIST	(ex NBS) National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD (États-Unis)
NMi-VSL	Nederlands Meetinstituut, Van Swinden Laboratorium, Delft (Pays-Bas)

NML	National Metrology Laboratory, Dublin (Irlande)
NORAMET	North American Metrology Cooperation
NPL	National Physical Laboratory, Teddington (Royaume-Uni)
NRC-INMS	Conseil national de recherches du Canada, Institut des étalons nationaux de mesure, Ottawa (Canada)
NRLM	National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba (Japon)
NRPA	Norwegian Radiation Protection Authority, Østerås (Norvège)
OFMET	Office fédéral de métrologie/Eidgenössisches Amt für Messwesen, Wabern (Suisse)
OIML	Organisation internationale de métrologie légale
OMH	Országos Mérésügyi Hivatal, Budapest (Hongrie)
OMP	Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse (France)
OP	Observatoire de Paris (France)
PSB	(ex SISIR) Singapore Productivity and Standards Board (Singapour)
PSPKR	Pusat Standardisasi dan Penelitian Keselamatan Radiasi Jakarta (Indonésie)
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig et Berlin (Allemagne)
PTTI	Precise Time and Time Interval Applications and Planning Meeting
RC	Radioisotope Centre, Otwock/Swierk (Pologne)
SIM	Sistema Interamericano de Metrologia
SMU	Slovenský Metrologický Ústav/Slovak Institute of Metrology, Bratislava (Slovaquie)
SO	Shanghai Observatory, Shanghai (Chine)
SP	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
SUN-AMCO	Symbols, Units and Nomenclature, Atomic Masses and Fundamental Constants, Commission de l'UICPA
UAI	Union astronomique internationale
UICPA	Union internationale de chimie pure et appliquée
UIPPA	Union internationale de physique pure et appliquée
UME	Ulusal Metroloji Enstitüsü/National Metrology Institute, Marmara Research Centre, Gebze-Kocaeli (Turquie)
USNO	U.S. Naval Observatory, Washington DC (États-Unis)

VNIFTRI	Institut des mesures physico-techniques et radiotechniques, Moscou (Féd. de Russie)
VNIIM	Institut de métrologie D.I. Mendéléev, Saint-Pétersbourg (Féd. de Russie)
VSL*	Van Swinden Laboratorium, Delft (Pays-Bas), voir NMi-VSL
VTT	Centre for Metrology and Accreditation, Technical Research Centre of Finland, Espoo (Finlande)

## 2 Sigles des termes scientifiques

ACES	Atomic Clock Ensemble in Space
EAL	Échelle atomique libre
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
JPS	Javad Positioning System
KTP	Potassium titanyle phosphate
SI	Système international d'unités
SIR	Système international de référence pour les mesures d'activité d'émetteurs de rayonnement gamma
TAI	Temps atomique international
TT	Temps terrestre
TWSTFT	Comparaison de temps et de fréquence par aller et retour sur satellite/Two-way Satellite Time and Frequency Transfer
TWSTT	Comparaison horaire par aller et retour sur satellite/Two-way Satellite Time Transfer
UTC	Temps universel coordonné
VLBI	Interférométrie à très longue base/Very Long Baseline Interferometry