

Bureau international des poids et mesures

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

(1^{er} juillet 2000 – 30 juin 2001)

Note sur l'utilisation du texte anglais (*voir* page 123)

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 92-822-2186-5

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^{er} juillet 2000 – 30 juin 2001) 19

- 1 Introduction **21**
 - 1.1 Introduction générale et résumé des travaux scientifiques **21**
 - 1.2 Publications, conférences et voyages du directeur **28**
 - 1.2.1 Publications extérieures **28**
 - 1.2.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **28**
 - 1.3 Activités du directeur en liaison avec des organisations extérieures **29**
- 2 Longueurs **30**
 - 2.1 Laser à Nd:YAG doublé à $\lambda \approx 532$ nm **30**
 - 2.2 Travaux au BIPM sur les générateurs de peignes optiques **31**
 - 2.3 Lasers à He-Ne asservis sur l'iode à $\lambda \approx 633$ nm en cuve interne **32**
 - 2.4 Lasers à diode asservis sur le rubidium à $\lambda \approx 778$ nm en utilisant les composantes hyperfines des transitions 5S-5D à deux photons **32**
 - 2.5 Lasers à He-Ne asservis sur le méthane à $\lambda \approx 3,39$ μm en cuve interne et externe **33**
 - 2.6 Cuves à iode **34**
 - 2.7 Études sur la structure hyperfine **34**
 - 2.8 Mesures de longueur : nanométrie **35**
 - 2.8.1 Lasers asservis à $\lambda \approx 532$ nm pour l'interférométrie **35**
 - 2.8.2 Interférométrie laser pour les mesures de déplacement **35**
 - 2.9 Gravimétrie **36**
 - 2.10 Publications, conférences et voyages : section des longueurs **36**
 - 2.10.1 Publications extérieures **36**
 - 2.10.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **38**

- 2.11 Activités liées au travail des Comités consultatifs **39**
- 2.12 Visiteurs de la section des longueurs **40**
- 2.13 Stagiaires, chercheurs associés et invités **41**
- 3 Masses et grandeurs apparentées **42**
 - 3.1 Prototypes et étalons de 1 kg **42**
 - 3.2 Balance à suspensions flexibles **43**
 - 3.3 Détermination de la masse volumique de l'air par trois méthodes **43**
 - 3.4 Mesure de l'indice de réfraction de l'air avec un nouveau réfractomètre **45**
 - 3.5 Balance hydrostatique **46**
 - 3.6 Balance de torsion pour la mesure de G **47**
 - 3.7 Propriétés magnétiques des étalons de masse **48**
 - 3.8 Contamination de surface des étalons de masse mesurés par ellipsométrie **48**
 - 3.9 Mesure de la fraction molaire de la vapeur d'eau dans l'air **49**
 - 3.10 Pression **49**
 - 3.11 Publications, conférences et voyages : section des masses **49**
 - 3.11.1 Publications extérieures **49**
 - 3.11.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **50**
 - 3.12 Activités liées au travail des Comités consultatifs **51**
 - 3.13 Visiteurs de la section des masses **51**
 - 3.14 Chercheurs invités **51**
- 4 Temps **52**
 - 4.1 Temps atomique international (TAI) et Temps universel coordonné (UTC) **52**
 - 4.2 Algorithmes pour les échelles de temps **52**
 - 4.2.1 Stabilité de l'EAL **52**
 - 4.2.2 Exactitude du TAI **53**
 - 4.3 Liaisons horaires **53**
 - 4.3.1 Mesures utilisant le code du Global Positioning System (GPS) et du Global Navigation Satellite System (GLONASS) **54**
 - 4.3.2 Mesures de phase **55**
 - 4.3.3 Comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite **56**
 - 4.4 Pulsars **56**
 - 4.5 Références spatio-temporelles **56**

- 4.6 Autres études **57**
- 4.7 Publications, conférences et voyages : section du temps **58**
 - 4.7.1 Publications extérieures **58**
 - 4.7.2 Publications du BIPM **61**
 - 4.7.3 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **61**
- 4.8 Activités en liaison avec des organisations extérieures **64**
- 4.9 Activités liées au travail des Comités consultatifs **64**
- 4.10 Visiteurs de la section du temps **65**
- 5 Électricité **65**
 - 5.1 Potentiel électrique : effet Josephson **65**
 - 5.1.1 Mesures de réseaux de jonctions de Josephson **65**
 - 5.1.2 Projet 429 de l'EUROMET (EUROMET.EM-K11) : comparaison d'étalons de tension de 10 V **65**
 - 5.1.3 Compérateur pour les mesures de diodes de Zener **65**
 - 5.2 Résistance électrique et impédance **66**
 - 5.2.1 Mesures de résistance en courant continu **66**
 - 5.2.2 Mesures d'étalons de résistance à effet Hall quantique à des fréquences de l'ordre du kilohertz **66**
 - 5.2.3 Conservation d'un étalon de référence de capacité et étalonnages de capacités **67**
 - 5.3 Détermination du bruit et de la stabilité des étalons de tension et des nanovoltmètres **68**
 - 5.3.1 Améliorations apportées à l'équipement pour la détermination des coefficients de température et de pression des étalons de tension à diode de Zener **69**
 - 5.3.2 Détermination du bruit et de la stabilité des étalons de tension à diode de Zener et des nanovoltmètres **69**
 - 5.4 Comparaisons clés continues du BIPM d'étalons électriques **70**
 - 5.5 Étalonnages **70**
 - 5.6 Publications, conférences et voyages : section d'électricité **71**
 - 5.6.1 Publications extérieures **71**
 - 5.6.2 Rapports BIPM **71**
 - 5.6.3 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **71**
 - 5.7 Activités en liaison avec des organisations extérieures **72**
 - 5.8 Activités liées au travail des Comités consultatifs **72**
 - 5.9 Visiteurs de la section d'électricité **72**

- 6 Radiométrie, photométrie et thermométrie **73**
 - 6.1 Radiométrie **73**
 - 6.2 Photométrie **74**
 - 6.3 Pression **75**
 - 6.4 Thermométrie **75**
 - 6.5 Étalonnages **75**
 - 6.6 Informatique **75**
 - 6.7 Publications, conférences et voyages : section de radiométrie, photométrie et thermométrie **76**
 - 6.7.1 Publications extérieures **76**
 - 6.7.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **76**
 - 6.8 Activités liées au travail des Comités consultatifs **77**
 - 6.9 Activités en liaison avec des organisations internationales **77**
 - 6.10 Visiteurs de la section de radiométrie, photométrie, thermométrie et manométrie **78**
 - 6.11 Stagiaires et étudiants **78**
- 7 Rayonnements ionisants **78**
 - 7.1 Rayons x et γ **78**
 - 7.1.1 Facteurs de correction pour les chambres étalons à paroi d'air **78**
 - 7.1.2 Étalons et équipements pour la dosimétrie **79**
 - 7.1.3 Comparaisons de dosimétrie **79**
 - 7.1.4 Étalonnages pour la dosimétrie **81**
 - 7.2 Radionucléides **81**
 - 7.2.1 Comparaison de mesures d'activité d'une solution de ^{204}Tl **81**
 - 7.2.2 Comparaison de mesures d'activité d'une solution de ^{152}Eu **81**
 - 7.2.3 Comparaison de mesures d'activité d'une solution de ^{89}Sr **82**
 - 7.2.4 Comparaison de mesures d'activité d'une solution de ^{238}Pu **82**
 - 7.2.5 Système international de référence pour la mesure d'activité d'émetteurs de rayonnement gamma (SIR) **83**
 - 7.2.6 Courbe d'efficacité du SIR **84**
 - 7.2.7 Mise en œuvre de la méthode du rapport des coïncidences triples aux coïncidences doubles (TDCR) **84**
 - 7.2.8 Spectrométrie de rayonnement gamma **85**

- 7.2.9 Systèmes primaires de mesure **85**
- 7.3 Publications, conférences et voyages : section des rayonnements ionisants **85**
 - 7.3.1 Publications extérieures **85**
 - 7.3.2 Rapports BIPM **86**
 - 7.3.3 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **86**
- 7.4 Activités en liaison avec des organisations extérieures **88**
- 7.5 Activités liées au travail des Comités consultatifs **88**
- 7.6 Visiteurs de la section des rayonnements ionisants **89**
- 7.7 Stagiaires, chercheurs invités et étudiants **89**
- 8 Chimie **90**
 - 8.1 Formulation du programme **90**
 - 8.2 Conception et construction du laboratoire **91**
 - 8.3 Activités en liaison avec des organisations extérieures **91**
 - 8.4 Activités liées au travail des Comités consultatifs **92**
 - 8.5 Publications, conférences et voyages : section de chimie **92**
 - 8.5.1 Publications extérieures **92**
 - 8.5.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **92**
- 9 La base de données du BIPM sur les comparaisons clés **94**
 - 9.1 État d'avancement de la base de données **94**
 - 9.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **95**
 - 9.3 Activités liées au travail des Comités consultatifs **95**
 - 9.4 Visiteurs et stagiaires **96**
- 10 Publications du BIPM **96**
 - 10.1 Rapports du CIPM et de ses Comités consultatifs **96**
 - 10.2 Metrologia **97**
 - 10.3 Site Internet du BIPM **98**
- 11 Réunions et exposés au BIPM **98**
 - 11.1 Réunions **98**
 - 11.2 Exposés **99**
- 12 Certificats et Notes d'étude **100**
 - 12.1 Certificats **100**
 - 12.2 Notes d'étude **102**

- 13 Gestion du BIPM **103**
 - 13.1 Comptes **103**
 - 13.1.1 Compte I : fonds ordinaires **103**
 - 13.1.2 Compte II : caisse de retraite **105**
 - 13.1.3 Compte III : fonds spécial pour l'amélioration du matériel scientifique **105**
 - 13.1.4 Compte IV : caisse de prêts sociaux **106**
 - 13.1.5 Compte V : réserve pour les bâtiments **106**
 - 13.1.6 Compte VI : Metrologia **107**
 - 13.1.7 Compte VII : fonds de réserve pour l'assurance maladie **107**
 - 13.1.8 Bilan au 31 décembre 2000 **108**
 - 13.2 Personnel **110**
 - 13.2.1 Engagements **110**
 - 13.2.2 Promotions et changements de grade **110**
 - 13.2.3 Chercheurs associés **110**
 - 13.2.4 Départs **110**
 - 13.3 Bâtiments **111**
 - 13.3.1 Petit Pavillon **111**
 - 13.3.2 Bâtiment des lasers **111**
 - 13.3.3 Observatoire **111**
 - 13.3.4 Bâtiment des rayonnements ionisants **111**
 - 13.3.5 Pavillon du Mail **111**

Liste des sigles utilisés dans le présent volume 113

ÉTATS MEMBRES DE LA CONVENTION DU MÈTRE ET ASSOCIÉS À LA CONFÉRENCE GÉNÉRALE

au 1^{er} juillet 2001

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
Grèce	Turquie
Hongrie	Uruguay
Inde	Venezuela
Indonésie	

Associés à la Conférence générale

Cuba	Lettonie
Équateur	Lituanie
Hong Kong, Chine	Malte

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 m²) du Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) mis à sa disposition par le Gouvernement français ; son entretien est assuré à frais communs par les États membres de la Convention du Mètre.

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), aux échelles de temps (1988) et à la chimie (2000). 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, en 1988 pour la bibliothèque et des bureaux, et en 2001 a été inauguré un bâtiment pour l'atelier, des bureaux et des salles de réunion.

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

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 γ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie α) ; cette dernière section a été dissoute en 1975, son domaine d'activité étant confié à la Section II) ;
7. le Comité consultatif des unités (CCU), créé en 1964 (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 et la métrologie en chimie (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 le *Rapport du directeur sur l'activité et la gestion du Bureau international des poids et mesures*.

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^{er} juillet 2001

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

Mme 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
MM. D. Avrons, R. Chayramy, A. Jaouen

Radiométrie et photométrie : M. R. Köhler

MM. R. Goebel, L. Le Mée, S. Solve, M. Stock
MM. 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

Mlle J. Viallon

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^{er} juillet 2000 – 30 juin 2001)

1 INTRODUCTION

1.1 Introduction générale et résumé des travaux scientifiques

L'activité a été très intense au BIPM cette année. En lisant soigneusement le rapport du directeur, vous pourrez constater que beaucoup de travaux scientifiques ont été réalisés dans les laboratoires du BIPM. Notre participation aux comparaisons clés a été élevée, ainsi que la visibilité du personnel scientifique : ce rapport mentionne vingt-cinq publications dans des journaux à comité de lecture et vingt et une publications dans des comptes rendus de conférences. Le personnel du BIPM a été présent et a participé activement à de nombreuses réunions de groupes de travail, conférences et comparaisons en dehors du BIPM : le nombre de voyages effectués par le personnel scientifique est de l'ordre de la centaine et ceux effectués par le directeur d'une vingtaine. Les étalonnages d'étalons pour les laboratoires nationaux de métrologie continuent à constituer une partie importante de nos activités, même si les travaux de rénovation de certains laboratoires ont entraîné la remise à une date ultérieure de certains d'entre eux. La base de données du BIPM sur les comparaisons clés est maintenant totalement en service et elle contient environ dix mille données sur les aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages des laboratoires nationaux de métrologie. Dans l'ensemble, l'arrangement de reconnaissance mutuelle (MRA) a entraîné, au BIPM comme dans les laboratoires nationaux, une augmentation considérable de la charge de travail du personnel scientifique de haut niveau, en particulier en ce qui concerne leur contribution à l'analyse des résultats des comparaisons clés. Le site Internet du BIPM continue à être de plus en plus consulté, les statistiques les plus récentes indiquent environ neuf cents connexions d'utilisateurs différents chaque jour.

Cette année a aussi été sans précédent quant au nombre des réunions qui ont eu lieu au BIPM. D'octobre 2000 à octobre 2001, date de la réunion du Comité international, auront eu lieu au BIPM huit réunions de Comités consultatifs et environ vingt-cinq réunions de groupes de travail et autres. En raison de l'intérêt accru pour les activités des Comités consultatifs, résultant de la mise en œuvre du MRA, le nombre des participants à ces réunions est bien plus élevé qu'autrefois. Il est maintenant courant d'avoir plus de cinquante personnes présentes à une réunion d'un Comité consultatif. Depuis octobre 2000, environ cinq cents personnes sont venues au BIPM pour des réunions ou des visites d'ordre général, nombre auquel il faut ajouter une

quarantaine de chercheurs associés invités au BIPM pour des périodes allant de quelques jours à une année. Toutes ces activités, ainsi que les responsabilités qui leur sont associées, reflètent la visibilité de plus en plus grande du BIPM.

L'ouverture d'un nouveau bâtiment, le Pavillon du Mail, le premier jour de la réunion du Comité consultatif pour la quantité de matière (CCQM) en avril 2001, a été un événement important pour la vie du BIPM. L'inauguration officielle de ce bâtiment aura lieu lors de la session d'octobre 2001 du Comité international.

Les travaux scientifiques effectués dans les laboratoires du BIPM constituent la base des autres activités. Sans eux, le personnel n'aurait pas la compétence nécessaire pour mener à bien les autres tâches qui sont imparties au BIPM par le Comité international et qui sont financées par les États membres de la Convention du Mètre. La prévision des travaux à venir est une part essentielle de notre activité de recherche. Nombreux sont les domaines de la métrologie où des progrès scientifiques sont réalisés, ou dont les besoins évoluent et ont une influence sur les activités du BIPM. Le changement le plus important concerne le laser à « peigne » femtoseconde qui permet la comparaison directe entre des étalons de fréquence optique et micro-onde. Il est devenu tout de suite évident que les activités de la section des lasers en seraient grandement affectées. Nous avons maintenant installé un système de laser à peigne au BIPM grâce à l'aide précieuse de nos collègues du JILA et du NIST à Boulder (États-Unis). Nous espérons être bientôt capables d'effectuer avec ce système des mesures directes de la fréquence de lasers asservis sur l'iode à la longueur d'onde de 633 nm, alors qu'au cours des trente années passées nous étions dépendants de la stabilité d'une série de lasers à 633 nm conservés au BIPM. Cela n'est que le début des changements que la technologie des systèmes à peignes va apporter. Il y aura certainement d'autres progrès connexes, comme par exemple la possibilité d'utiliser des étalons à fréquence optique comme candidats potentiels pour une nouvelle définition de la seconde ; nous les suivrons de près.

Le texte qui suit est un résumé des travaux effectués dans les laboratoires du BIPM ; ces travaux sont ensuite détaillés section par section. Le rapport a été rédigé pour présenter l'état d'avancement des travaux à la date du 1^{er} juillet 2001. Il donne la liste des publications publiées depuis la parution du précédent rapport, daté du 1^{er} juillet 2000.

Longueurs : Cette année, les comparaisons internationales concernent principalement les lasers fonctionnant à la longueur d'onde recommandée $\lambda \approx 532$ nm. Les lasers du BIPM ont participé à des comparaisons avec les

laboratoires nationaux suivants : le BNM-INM, le CMI, le MIKES et le NMIJ/AIST (précédemment dénommé NRLM). Avec le laser à diode transportable asservi sur le rubidium à $\lambda \approx 778$ nm, appartenant au BNM-LPTF/OP, le BIPM a participé au NMIJ/AIST à une comparaison internationale de tels systèmes, en particulier des étalons de ce laboratoire. Bien que les comparaisons de lasers à $\lambda \approx 633$ nm aient été moins nombreuses cette année, des comparaisons bilatérales ont été effectuées au BIPM avec le CEM, le NCM et l'OMH. Le premier générateur de peignes du BIPM a été comparé avec succès à un appareil similaire appartenant au JILA, grâce à l'aide apportée par le personnel du JILA. La collaboration avec l'Institut Lebedev se poursuit avec la construction et les essais d'un nouveau laser télescopique à $\lambda \approx 3,39$ μm .

Masses : Le nombre d'étalonnages a augmenté cette année, pour répondre semble-t-il à la mise en question de la stabilité des prototypes nationaux de 1 kg en platine iridié depuis leur nettoyage-lavage effectué pendant la troisième vérification périodique des étalons nationaux du kilogramme (1988-1992). À cet effet, nous avons réétalonné nos propres étalons de travail. Des mesures approfondies visant à comparer trois méthodes de détermination de la masse volumique de l'air — la méthode du CIPM fondée sur une équation d'état, celle fondée sur des objets pour mesurer la poussée de l'air, et celle fondée sur l'utilisation d'un réfractomètre — ont été menées à terme. Les deux premières méthodes déterminent de manière absolue la masse volumique de l'air alors que la troisième mesure des variations relatives de masse volumique de l'air. La méthode fondée sur des objets pour mesurer la poussée de l'air demande de connaître le volume de ces objets. La détermination du volume des objets en question, effectuée par nos collègues de la PTB, mettra un point final à cette étude. Depuis l'an dernier, notre nouvel appareil pour la détermination hydrostatique de volumes a été entièrement équipé. L'appareil est fonctionnel et il est soumis à des essais de mise en service. Nous continuons à nous intéresser fortement au susceptomètre magnétique mis au point au BIPM pour vérifier les propriétés magnétiques des étalons de masse, en particulier ceux en acier inoxydable. Une comparaison de mesures de ce type entre quatre laboratoires de mesures de masse européens et le BIPM a été couronnée de succès.

L'expérience sur la mesure de G , la constante newtonienne de gravitation, est terminée. L'incertitude-type relative de notre résultat final est bien en-dessous de la valeur cible de 1×10^{-4} . Toutefois, un désaccord de 2×10^{-4} par rapport à une autre expérience pour laquelle est annoncée une incertitude

bien plus faible que la nôtre nous pousse à continuer ce travail avec un appareil amélioré.

Temps : La stabilité à moyen terme du Temps atomique international, TAI, exprimée au moyen de l'écart-type d'Allan relatif, est estimée à environ $0,6 \times 10^{-15}$ pour des durées moyennes de vingt à quarante jours. Depuis janvier 2001, une nouvelle procédure est utilisée pour assigner le poids relatif maximal des horloges du TAI en fonction du nombre d'horloges participant au calcul. On espère que cette méthode améliorera à l'avenir la stabilité de l'échelle de temps qui en résulte. L'exactitude du TAI est fondée sur huit étalons primaires de fréquence : les trois étalons classiques CS1, CS2 et CS3 de la PTB, fonctionnant en continu ; les trois étalons à pompage optique CRL-01, LPTF-JP0 et NRLM-4 ; et les deux fontaines à césium NIST-F1 et PTB CSF1. En raison de l'amélioration de la stabilité du TAI et de l'augmentation du nombre des étalons primaires, l'unité d'échelle du TAI correspond, selon nos estimations, à la seconde du SI à 2×10^{-15} près depuis août 2000. Les activités de recherche de la section ont été en grande partie consacrées à l'étude des comparaisons de temps et de fréquence 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 pour le calcul du TAI les données de récepteurs du GPS à canaux multiples pour trois liaisons, et quatre autres liaisons horaires 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. Depuis janvier 2001, la section du temps du BIPM établit avec l'USNO des conventions pour les systèmes de référence spatio-temporels dans le cadre du Convention Product Centre du Service international de la rotation terrestre. D'autres activités de recherche concernent les pulsars, les projets d'utilisation d'horloges dans l'espace et l'interférométrie atomique.

Électricité : Une nouvelle comparaison directe des deux étalons de 10 V du BIPM à effet Josephson a été effectuée sur une durée de quatre jours. La différence moyenne était de 30 pV avec un écart-type de la moyenne égal à 40 pV. C'est l'incertitude la plus faible que nous ayons jamais obtenue dans des comparaisons directes d'étalons de Josephson.

Nous avons poursuivi les avancées importantes de l'an dernier dans l'amélioration des mesures de la résistance de Hall quantifiée de haute exactitude à des fréquences de l'ordre du kilohertz, en préparant deux têtes constituées de dispositifs à effet Hall quantique équipés de grilles. Au moyen de ces dispositifs, nous avons répété avec succès nos mesures et démontré qu'en ajustant de manière appropriée la tension des grilles, le coefficient résiduel de fréquence de la résistance de Hall quantifiée est de l'ordre de 1 à 2×10^{-8} par kilohertz. Une amélioration importante a été apportée à la résistance coaxiale alternatif-continu qui établit la liaison entre les mesures de résistance à 1 Hz et celles à des fréquences de l'ordre du kilohertz dans la chaîne de mesure du BIPM reliant les étalons de capacité de 10 pF à la résistance de Hall quantifiée.

Les études précédentes faites au BIPM montrent que l'incertitude des mesures de tension de tous les étalons de tension à diodes de Zener est limitée par le bruit en $1/f$ déterminé au moyen de la variance d'Allan. Cette année, nous avons étudié la validité statistique de ces résultats en répétant les mesures quelques centaines ou milliers de fois afin de déterminer la distribution expérimentale des valeurs de la variance d'Allan obtenues. Les résultats sont utiles pour l'évaluation de la validité statistique de petites différences reproductibles de la valeur du palier de bruit en $1/f$ des étalons à diode de Zener.

Les étalonnages de la section d'électricité continuent à démontrer l'importance des services offerts par le BIPM aux laboratoires nationaux de métrologie. Nous avons effectué les étalonnages suivants : sept étalons de tension à diodes de Zener pour trois laboratoires nationaux de métrologie ; quinze étalons de résistance pour cinq laboratoires nationaux ; et sept étalons de capacité pour deux laboratoires nationaux. Nous avons aussi effectué quatre nouvelles comparaisons dans le cadre de la comparaison clé permanente du BIPM d'étalons de tension.

Radiométrie, photométrie : La comparaison clé de sensibilité spectrale se poursuit. Les deux séries de mesures sont terminées, si l'on exclut quelques récepteurs délivrés avec retard. Après la comparaison CCPR-S3, la comparaison supplémentaire de radiomètres cryogéniques, deux laboratoires ont demandé à effectuer des comparaisons bilatérales avec le BIPM, l'une d'entre elles est en cours. Dans le domaine de la radiométrie, les travaux entrepris sur la réalisation de l'éclairement énergétique spectral au moyen d'un corps noir à caloduc à sodium ont dû être arrêtés par suite d'une fuite du caloduc. Entretemps, le système a été réparé. Le BIPM a aussi participé à la comparaison supplémentaire du CCPR d'aires d'ouverture. Lors de nos

travaux de recherche, nous avons découvert et trouvé une explication à un effet intéressant qui s'est avéré dépendre de la forme du faisceau laser. Dans une autre expérience, le logiciel de contrôle du spectro-radiomètre a été amélioré par l'adjonction d'outils de programmation graphiques. Les installations du laboratoire de photométrie ont été entièrement renouvelées au cours de l'année passée : l'ancien banc photométrique a été remplacé et un système amélioré de positionnement des lampes et de lecture des mesures a été introduit. Dans le domaine de la photométrie également, nous avons établi un lien robuste pour le transfert au BIPM des valeurs de référence des deux comparaisons clés CCPR-K3 et CCPR-K4 fondées sur des lampes, déterminées récemment. Cela a été réalisé par comparaison bilatérale avec la PTB, le laboratoire pilote de ces deux comparaisons clés. Dans le domaine de la thermométrie, trente-trois thermomètres à résistance de platine ont été étalonnés pour cinq sections du BIPM, et nous avons ensuite étudié la stabilité de cellules à point triple de l'eau et de cellules au gallium. L'équipe informatique continue à apporter son aide et ses services au personnel du BIPM. Le nombre de consultations sur le site Internet du BIPM continue à augmenter et les bases de données contenant les annexes B et C du MRA ont été mises au point et sont consultables en ligne.

Rayonnements ionisants : Le programme de mise à niveau des laboratoires est terminé et le renouvellement des équipements se poursuit conformément au programme. La nouvelle source de ^{60}Co a été installée et sera bientôt mesurée. Bien que cela nous ait contraints à interrompre nos activités pendant quelque temps, neuf comparaisons de dosimétrie, auxquelles ont participé sept laboratoires nationaux de métrologie, ont été effectuées depuis l'an dernier, ainsi que dix-sept étalonnages pour des laboratoires possédant des étalons secondaires. La réunion du CCRI qui s'est tenue en mai 2001 a été centrée sur l'analyse des résultats des comparaisons clés du BIPM et du CCRI, et sur la procédure pour entrer les résultats dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés. La décision a été prise d'utiliser les nouveaux facteurs de correction pour les étalons du BIPM pour les rayons x, facteurs déterminés au BIPM au moyen de la méthode de calcul de Monte Carlo. De plus, la première comparaison clé de la Section I du CCRI est presque terminée ; neuf laboratoires nationaux de métrologie possédant des étalons primaires y ont participé. Dans le domaine des radionucléides, le groupe de travail sur le ^{204}Tl a présenté ses conclusions et a proposé une nouvelle comparaison à la Section II du CCRI. Les comparaisons de ^{152}Eu et de ^{89}Sr se sont bien déroulées ; elles comptaient vingt-trois et dix-neuf participants respectivement. Nous attendons les résultats de la comparaison

de ^{238}Pu . Quatre autres comparaisons devraient débiter avant le printemps 2002. Huit laboratoires ont soumis des radionucléides au Système international de référence (SIR) cette année, et le nombre total de comparaisons est maintenant de cinquante-huit ; l'une d'entre elles, de ^{177}Lu , est nouvelle. Le Groupe de travail sur les comparaisons clés prépare l'analyse de ces résultats et de ceux des neuf comparaisons clés de la Section II du CCRI maintenant terminées pour qu'ils figurent dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés. La plupart de ces travaux sont fondés sur la monographie sur le SIR qui sera bientôt publiée. Les courbes d'efficacité du SIR ont été à nouveau caractérisées pour les émetteurs de rayonnement gamma et bêta. Nous avons mesuré avec le spectromètre gamma Ge(Li) du BIPM les niveaux d'activité des impuretés de six radionucléides soumis au SIR et les laboratoires nationaux de métrologie ont utilisé les valeurs mesurées au BIPM pour leurs besoins. Le système d'acquisition des données a été mis à niveau pour les méthodes de mesures primaires au BIPM et un système de comptage numérique des coïncidences est soumis à des essais. La méthode du rapport des coïncidences triples aux coïncidences doubles, en cours de mise au point, devrait bientôt être appliquée à titre expérimental à l'extension du SIR aux émetteurs de rayonnements gamma purs.

Chimie : Après consultation des experts du Groupe de travail du CCQM sur l'analyse de gaz, nous envisageons d'entreprendre un programme de comparaisons et de recherche fondamentale sur les mesures d'ozone, en collaboration avec le NIST. Il en résultera un transfert de responsabilité des comparaisons internationales de photomètres de référence pour les mesures d'ozone au BIPM. Les travaux pour les laboratoires de la section de chimie devraient s'achever à l'été 2001, et deux photomètres de référence du NIST pour les mesures d'ozone devraient être installés et soumis à des essais à l'automne 2001. Les comparaisons devraient s'accompagner d'un programme de recherche au BIPM pour étayer la photométrie de l'ozone par des mesures de titrage en phase gazeuse de monoxyde d'azote et de dioxyde d'azote, et par la mesure des sections efficaces de l'ozone dans l'ultraviolet. Le programme a été présenté pendant l'atelier sur le projet 414 de l'EUROMET (ozone), et il aboutira à la formulation de l'étude pilote du CCQM sur l'équivalence des photomètres de référence pour les mesures de l'ozone (CCQM-P28).

Base de données du BIPM sur les comparaisons clés : La base de données du BIPM sur les comparaisons clés est totalement opérationnelle. Elle contient plus de dix-mille données sur les aptitudes des laboratoires

nationaux de métrologie en matière de mesures et d'étalonnages ainsi qu'un nombre croissant de résultats de comparaisons clés.

1.2 Publications, conférences et voyages du directeur

1.2.1 Publications extérieures

1. Quinn T.J., Measuring big G , *Nature*, 21/28 décembre 2000, **408**, 919-921.
2. Quinn T.J., International Report: News from the BIPM, *Metrologia*, 2000, **38**, 89-94.
3. Quinn T.J., Letter to the Editor: On the use of the term "scale(s)" in radiometric and photometric metrology/Reply, *Metrologia*, 2000, **37**, 548.

1.2.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

T.J. Quinn s'est rendu à :

- Ottawa (Canada), le 17 juillet 2000, les 20 et 21 novembre 2000, et les 29-30 mars 2001, pour une réunion du conseil de l'Institut des étalons nationaux de mesure du NRC-CNRC ;
- Varenna (Italie), du 25 juillet au 4 août 2000, en qualité de co-directeur de l'International School of Physics « Enrico Fermi », Recent Advances in Metrology and Fundamental Constants ;
- Lisbonne (Portugal), le 7 septembre 2000, pour un exposé à Euro-analysis 2000 ;
- Londres (Royaume-Uni), le 9 octobre 2000, pour la Conférence générale de l'OIML ;
- Londres (Royaume-Uni), le 26 octobre 2000, le 8 février et le 28 juin 2001, pour des réunions du Paul Instrument Fund Committee ;
- Londres (Royaume-Uni), le 7 novembre 2000, pour un exposé au symposium célébrant le centenaire du NPL ;
- Genève (Suisse), le 10 novembre 2000, pour rencontrer le secrétaire général de l'Organisation météorologique mondiale ;
- à São Paulo (Brésil), les 3 et 4 décembre 2000, pour une réunion des présidents des groupes de travail du CCQM, et le 5 décembre 2000, pour un exposé au symposium Metrologia 2000 ;

- à Turin (Italie), le 18 décembre 2000, pour une réunion du conseil scientifique de l'IMGC ;
- à Braunschweig (Allemagne), le 6 février 2001, pour visiter la PTB ;
- à Geel (Belgique), le 12 février 2001, pour un exposé au Pre-accession Symposium à l'IRMM ;
- à New-Orleans (États-Unis), le 4 mars 2001, pour un exposé à une session spéciale de PittCon 2001 pour célébrer le centenaire du NIST ;
- à Gaithersburg (Maryland, États-Unis), le 10 mars 2001, pour le NIST Centennial Symposium, pour une réunion des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie et pour la 6^e réunion du JCRB ;
- à Genève (Suisse), le 25 avril 2001, pour rencontrer les secrétaires généraux de l'ISO et de la CEI, et le président de l'ISO/CASCO ;
- à Geel (Belgique), le 11 mai 2001, pour une réunion sur la traçabilité en chimie clinique ;
- à Bern (Suisse), les 16 et 17 mai 2001, pour une réunion de l'EUROMET et un exposé pour l'inauguration du nouveau bâtiment du METAS ;
- à Karuizawa (Japon), du 18 au 22 mai 2001, pour une réunion du bureau du Comité et des contacts avec la nouvelle organisation de laboratoires nationaux de métrologie japonaise, et un exposé à un symposium célébrant la création du NMIJ ;
- à Beijing (Chine), du 24 au 26 mai 2001, pour une visite du NIM ;
- à Bad Honnef (Allemagne), les 11 et 12 juin 2001, pour un exposé au 250th Heraeus Foundation Symposium.

1.3 Activités du directeur en liaison avec des organisations extérieures

Le directeur 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'Institut des étalons nationaux de mesure du NRC, membre du CODATA Task Group on Fundamental Constants, et de l'Interdivisional Committee on Nomenclature and Symbols de l'UICPA. Il représente la Royal Society au Paul Instrument Fund. Il est président du Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM (JCRB) et du Comité commun pour les guides en métrologie (JCGM).

2 LONGUEURS (J.-M. CHARTIER)

2.1 Laser à Nd:YAG doublé à $\lambda \approx 532$ nm

(L.S. Ma*, S. Picard et L. Robertsson ; J. Labot)

Un changement technologique dans le domaine des lasers à l'état solide s'effectue en ce moment au niveau mondial dans la communauté des utilisateurs. Nous espérons que les lasers à Nd:YAG ou à source similaire joueront un rôle de plus en plus important à l'avenir dans les activités qui se rapportent aux étalons. À cet égard, le BIPM participe depuis plusieurs années à la mise au point de lasers étalons à Nd:YAG asservis sur l'iode. Ces étalons ont montré des performances satisfaisantes [7] et un certain nombre de laboratoires nationaux de métrologie ont débuté des programmes de travail dans ce domaine.

Pour mettre au point un étalon bien établi, il est nécessaire de vérifier la reproductibilité et les autres caractéristiques de ces systèmes. C'est pourquoi nous avons débuté une série de comparaisons au BIPM pendant l'année : une première comparaison avec le BNM-INM et le NMIJ/AIST (anciennement dénommé NRLM) (du 11 au 24 octobre 2000), et une deuxième (du 7 au 23 mai 2001) avec le BNM-INM, le CMI et le MIKES. La dispersion des fréquences des lasers du deuxième groupe était meilleure que 5 kHz. Pendant la comparaison, la reproductibilité de la fréquence des lasers considérés à titre individuel, toutefois, était d'environ 400 Hz en moyenne. Nous envisageons de continuer cette série de comparaisons l'an prochain afin de pouvoir offrir un réseau international de fréquences absolues exactes à la longueur d'onde de 532 nm, en liaison avec les mesures locales absolues de la fréquence des lasers à Nd:YAG.

La structure hyperfine complète de la transition R(56) 32-0 de $^{127}\text{I}_2$ a été mesurée avec les lasers de référence du BIPM et une série de constantes hyperfines a été adaptée aux résultats. Une incertitude de l'ajustement inférieure à 400 Hz a été obtenue [7].

Un troisième système laser, plus petit, est en cours de mise au point en ce moment pour établir un groupe de référence bien caractérisé dont la fréquence serait très stable ; il sera maintenu au BIPM et utilisé comme étalon de transfert pour des laboratoires extérieurs.

* Chercheur invité depuis le 24 janvier 2000.

2.2 Travaux au BIPM sur les générateurs de peignes optiques

(L. Robertsson, L.S. Ma et S. Picard)

Une révolution dans les mesures de fréquences optiques a eu lieu récemment, démontrant qu'il est possible de mesurer en une seule étape des fréquences optiques en utilisant l'asservissement en mode ultra-rapide de lasers générateurs de peignes de fréquence. Un programme d'activités a immédiatement débuté au BIPM et un laser femtoseconde semi-commercial a été acquis en octobre 2000. Pendant l'année passée, le BIPM a collaboré étroitement avec le JILA et le NIST à Boulder : L.S. Ma y a séjourné plusieurs mois, travaillant en partie pour le BIPM et en partie pour le JILA, et au début de 2001 L. Robertsson a effectué deux longs séjours au NIST.

Au début de 2001, le BIPM a été invité par le NIST à participer à une expérience utilisant deux peignes de ce type pour transférer l'excellente stabilité des étalons à fréquence optique à calcium et à ions mercure au domaine des radiofréquences. Le BIPM a ainsi eu la possibilité de parachever simultanément son propre peigne. Après cette expérience, une seconde vérification des performances de la technologie des peignes a été effectuée. En asservissant deux peignes aux mêmes oscillateurs locaux, l'un optique et l'autre à radiofréquence, nous avons vérifié l'homogénéité des peignes sur l'ensemble du spectre optique. L'instabilité observée de la fréquence n'excède pas 10^{-15} en valeur relative pour un temps de moyenne de 1 s.

Grâce à l'aide précieuse du personnel du JILA, la majeure partie de l'électronique nécessaire aux mesures de peignes a été installée par L.S. Ma. En utilisant le peigne du JILA, les mesures à long terme et les mesures régulières de la stabilité des lasers à Nd:YAG du JILA ont montré des instabilités relatives inférieures à 3×10^{-13} sur un an. Une étude des techniques de contrôle de la fréquence du peigne a été effectuée. Le contrôle complet de la fréquence de chaque composante du peigne est un problème bi-dimensionnel. Les actionneurs permettant d'assurer ce contrôle ne sont malheureusement pas indépendants, aussi un système de contrôle plus sophistiqué est-il nécessaire. Une nouvelle technique de synchronisation et d'asservissement de la phase de deux lasers femtosecondes indépendants est en cours de mise au point. La stabilité de la synchronisation peut être meilleure que 5 fs et la stabilité de l'asservissement de la phase entre deux lasers femtosecondes est inférieure à 200 mHz. Grâce à cette technique, on montre la cohérence entre deux lasers femtosecondes dans le domaine du temps, il est donc possible de synthétiser des impulsions lumineuses ultra-

courtes et d'obtenir une bande très large pour le laser à peigne femtoseconde. Cela ouvre des possibilités intéressantes pour la métrologie future des fréquences et le contrôle quantique de la cohérence.

La première comparaison internationale de mesures de la fréquence absolue avec des techniques de peignes a été effectuée au début du mois de juin 2001. La fréquence d'un laser à Nd:YAG asservi sur l'iode a été mesurée en utilisant deux peignes simultanément, l'un appartenant au BIPM et l'autre au JILA. Le peigne du BIPM, placé au NIST, a reçu la lumière du laser du JILA à travers une fibre optique de 3 km de long.

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

Cette année, les deux lasers de référence du BIPM, BIPM4 et BIW167, ont été comparés quatre fois. Leur différence de fréquence se situe dans les limites de $\pm 1,5$ kHz.

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

- du 23 au 27 octobre 2000, au BIPM, entre le CEM et le BIPM, et entre l'OMH et le BIPM ;
- du 20 au 31 mars 2001, au BIPM, entre le NCM et le BIPM.

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

Il y plusieurs mois, nous avons acheté un nouveau système d'acquisition des données pour les mesures de battements de fréquences, utilisant un logiciel conçu par la société Winters Electro Optics.

2.4 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)

Avec le système transportable appartenant au BNM-LPTF/OP, nous avons participé à une comparaison internationale de lasers de référence similaires et à une série de mesures connexes. Cette expérience a été menée au NMIJ/AIST (précédemment dénommé NRLM) du 4 au 19 mars 2001. La fréquence absolue de dispositifs stationnaires, déterminée il y a plusieurs années au BNM-LPTF, a été transférée à l'étalon japonais et nous a permis d'établir avec une exactitude inégalée les fréquences de quelques raies spectrales de l'acétylène dans le domaine de $1,55 \mu\text{m}$.

Nous voulons à cette occasion remercier le NMIJ, l'AIST et en particulier MM. Matsumoto et Onae pour le financement intégral de cette expérience.

À notre retour du Japon, nous avons vérifié la répétabilité de la fréquence du dispositif transportable du BNM-LPTF/OP en effectuant une nouvelle série de comparaisons de fréquence entre différents dispositifs du BNM-LPTF/OP.

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

La fabrication et l'étude de tubes laser à He-Ne et de cuves à méthane se poursuit. De nouveaux prototypes conçus pour nos systèmes laser et fondés sur la technique « deux modes » sont maintenant mis sous vide et nous nous préparons à les remplir de gaz.

Le laser BIDM1 que nous avons acheté en 1998 à l'Institut Lebedev (Moscou, Féd. de Russie) a été reconstruit. Le laser télescopique a été séparé des lasers hétérodyne et de référence, et par conséquent l'interférence acoustique entre ces systèmes a diminué de manière significative. La fréquence du laser BIDM1 a été mesurée à nouveau en décembre 2000 à la PTB. Pour cela, nous avons participé à une série de mesures de fréquence absolue au niveau international, qui ont aussi été effectuées avec des étalons de fréquence optique transportables (TOFS) appartenant à l'Institut Lebedev, au NPL et à l'UME.

Un dispositif expérimental a été construit pour vérifier la symétrie radiale de la distribution de champ à l'intérieur de la cuve télescopique de BIDM1. C'est un des principaux facteurs qui limitent la reproductibilité de la fréquence de ces lasers de référence.

L'Institut Lebedev a conçu et installé au BIPM un nouveau laser télescopique avec un faisceau de diamètre 100 mm (Tel-100). Dans ce laser, le doublet de recul de chaque composante hyperfine de la raie F_2^2 est résolu. Des comparaisons de fréquence entre Tel-100 et BIDM1 sont en cours et des décalages observés de fréquence inférieurs à 10 Hz sont à l'étude. Pendant ces mesures, un nouvel effet désigné « décalage de fréquence de type phase des étalons de fréquence optique transportables » a été observé. Cet effet limite la répétabilité de la fréquence de ces étalons à un niveau situé entre 10 Hz et 20 Hz. Les exigences générales que requiert la conception d'une nouvelle génération d'étalons de ce type présentant une répétabilité de

* Chercheur invité du 10 août 2000 au 31 août 2001.

fréquence meilleure que 1 Hz ont été formulées et seront publiées ultérieurement.

Un dispositif expérimental a été construit pour la mesure des pertes optiques d'éléments d'un résonateur laser avec une incertitude relative de l'ordre de 10^{-3} . Nous avons vérifié et comparé des miroirs utilisant différentes technologies de revêtement optique et il a été possible d'en trouver qui conviennent à la nouvelle génération de TOFS.

Dans le cadre de la collaboration entre le BIPM et l'Institut Lebedev, des discussions ont eu lieu sur la mise au point des TOFS. Les nouveaux systèmes seront fondés sur la technologie des gyrolasers en utilisant un matériau nommé sytall (similaire au zérodur) qui a un faible coefficient de dilatation thermique.

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

Après nettoyage de notre système à vide et une nouvelle distillation de la réserve d'iode, nous avons réussi à produire des cuves à iode satisfaisantes. De temps en temps pendant l'année, nous avons à nouveau rencontré le problème découvert l'an passé : des décalages de fréquence de 5 kHz à 10 kHz ont été observés. Des recherches sont en cours pour résoudre ce problème.

Cette année a été marquée par une intense activité de remplissage de cuves : seize cuves de type S et quatre cuves de type N de longueur 10 cm ; trois cuves fabriquées par l'université de Shanghai avec des fenêtres traitées ; une cuve de l'ONERA ; et trois cuves de l'École centrale de Lyon. La fréquence de quinze cuves a aussi été vérifiée.

Le système d'acquisition des données pour les mesures de Stern-Volmer, destinées à vérifier la qualité des cuves à iode, a été automatisé. Depuis, vingt-cinq cuves remplies au BIPM ont été mesurées. Deux cuves du NMIJ/AIST, deux cuves de l'université de Shanghai remplies au BIPM, et quatre cuves remplies à l'ISI (Brno) ont aussi été vérifiées en liaison avec les comparaisons de lasers à Nd:YAG à la longueur d'onde 532 nm.

2.7 Études sur la structure hyperfine (S. Picard)

Pour déterminer la qualité des lasers du BIPM (*voir* 2.1), le programme de calcul de la structure hyperfine du BIPM a été utilisé pendant l'année pour fournir une série de constantes ajustées d'après les données de structures

hyperfines. Il a aussi été utilisé pour ajuster les composantes des transitions mesurées pendant la comparaison internationale de lasers à Nd:YAG à la longueur d'onde de 532 nm en mai 2001 au BIPM.

Ultérieurement, en collaboration avec le groupe de M. Shy de l'université nationale Tsing Hua à Taïwan (Chine), les constantes hyperfines de cinq transitions différentes qui n'avaient pas été analysées précédemment ont été calculées.

2.8 Mesures de longueur : nanométrie (L.F. Vitouchkine)

2.8.1 Lasers asservis à $\lambda \approx 532$ nm pour l'interférométrie (L.F. Vitouchkine et J.-M. Chartier)

Deux têtes de lasers à Nd:YVO₄ compacts à l'état solide pompés par diode et fonctionnant à la longueur d'onde de 532 nm, à fréquence doublée dans un cristal de KTP, ont été fabriquées à l'Institut de physique des lasers (Saint-Petersbourg) en collaboration avec le BIPM. L'une des deux têtes comprend une diode laser pompée couplée à l'aide d'une fibre optique et l'autre une diode interne. Les têtes laser et les lasers asservis sur l'iode dans lesquels elles sont installées ont été étudiés au BIPM. La technique d'asservissement de fréquence de la troisième harmonique a été employée pour vérifier l'électronique d'asservissement analogique et numérique. Une stabilité de fréquence relative meilleure que 10^{-12} a été obtenue pour un temps de moyenne de 10 s.

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

La première partie du logiciel INTERFBEAM servant à calculer la figure d'interférences obtenue avec un interféromètre à deux faisceaux a été mise au point. Le trait distinctif de ce logiciel est qu'il est conçu pour calculer la figure d'interférences d'un interféromètre réel, c'est-à-dire prenant en compte les imperfections éventuelles et les défauts d'alignement. Le faisceau d'entrée est défini en fonction du rayon de courbure du front d'ondes, et la nature et les paramètres de la distribution d'amplitude stochastique sont pris en compte.

La propagation du faisceau dans l'interféromètre est modélisée en utilisant une approximation quasi optique. Le logiciel permet d'étudier l'influence de

la qualité du faisceau d'entrée et des paramètres associés au dispositif optique sur la distribution des gradients de champ locaux des fronts d'onde qui interfèrent dans le plan d'observation.

La figure d'interférences peut être calculée pour un grand nombre de dispositifs expérimentaux. Le calcul peut être appliqué à un interféromètre à deux faisceaux utilisant des réflecteurs coniques, aussi bien qu'à un diffractomètre laser interférométrique destiné à mesurer le pas des réseaux de diffraction.

2.9 Gravimétrie (L.F. Vitouchkine, Z. Jiang et J.-M. Chartier)

Les mesures régulières de l'accélération en chute libre au point A du micro-réseau gravimétrique du BIPM se poursuivent avec le gravimètre absolu FG5-108. En mars-avril 2001, le gravimètre a été envoyé en réparation à Micro-g Solutions (États-Unis).

Un atelier « *New Techniques for Absolute Gravimeters – NTAG 2001* » a été organisé au BIPM les 26 et 27 février 2001 ; vingt-trois participants de sept pays différents y ont pris part. Nous avons effectué les préparatifs pour la sixième comparaison internationale de gravimètres absolus (ICAG 2001) et pour l'atelier sur l'état actuel et les perspectives à venir de la gravimétrie absolue qui doit se tenir les 16 et 17 juillet 2001.

Un nouveau local avec cinq points pour la mesure de l'accélération en chute libre a été aménagé au Pavillon du Mail. Des mesures géodésiques d'altitude de tous les points du micro-réseau gravimétrique ont été effectuées par le BRGM (Orléans).

2.10 Publications, conférences et voyages : section des longueurs

2.10.1 Publications extérieures

1. 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 comparison of He-Ne lasers stabilized with $^{127}\text{I}_2$ at $\lambda \approx 633$ nm, comparison of the fifth and third harmonic-locking technique, *Metrologia*, 2000, **37**, 701-707.

2. Robertsson L., Francis O., van Dam T., Faller J., Ruess D., Delinte J.-M., Vitushkin L., Liard J., Gagnon C., Guo You Guang, Huang Da Lun, Fang Yong Yuan, Xu Jin Yi, Jeffries G., Hopewell H., Edge R., Robinson I., Kibble B., Makinen J., Hinderer J., Amalvict M., Luck B., Wilmes H., Rehren F., Schmidt K., Schnull M., Cerutti G., Germak A., Zabek Z., Pachuta A., Arnautov G., Kalish E., Stus Y., Stizza D.J., Friederich J., Chartier J.-M., Marson I., Results from the fifth international comparison of absolute gravimeters, ICAG 97, *Metrologia*, 2001, **38**, 71-78.
3. Ye J., Yoon T.H., Hall J.L., Madej A., Bernard J.E., Klaus J., Siemsen J., Marmet L., Chartier J.-M., Chartier A., Accuracy comparison of optical frequency measurement between harmonic-generation synthesis and a frequency division femtosecond-comb, *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**, 3797-3800.
4. Yoon T.H., Ye J., Hall J.L., Chartier J.-M., Absolute frequency measurement of the iodine-stabilized He-Ne laser at 633 nm, *Appl. Phys. B.*, 2001, **72**, 221-226.
5. Shen S., Ni Y., Qian J., Liu Z., Shi C., An J., Wang L., Iwasaki S., Ishikawa J., Hong F.-L., Suh H.S., Labot J., Chartier A., Chartier J.-M., International comparisons of He-Ne lasers stabilized with $^{127}\text{I}_2$ at $\lambda \approx 633$ nm (July 1997), Part VIII: Comparison of NIM (China), NRLM (Japan), KRISS (Rep. of Korea) and BIPM lasers at $\lambda \approx 633$ nm, *Metrologia*, 2001, **38**, 181-186.
6. Chartier J.-M., Chartier A., I₂-Stabilized 633 nm He-Ne lasers: 25 years of international comparisons, *In Laser Frequency Stabilization, Standards, Measurement and Applications*, *Proc. SPIE*, 2001, **4269**, 123-133.
7. Robertsson L., Ma L.S., Picard S., Improved iodine-stabilized Nd:YAG lasers, laser frequency stabilization, standards, measurement and applications, *Proc. SPIE*, 2001, **4269**, 268-271.
8. Hong F.L., Ye J., Ma L.S., Picard S., Bordé Ch.J., Hall J.L., Rotation dependence of electric quadrupole hyperfine interaction in the ground state of molecular iodine by high-resolution laser spectroscopy, *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**, 379-387.

2.10.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

J.-M. Chartier s'est rendu au JV, Oslo (Norvège), du 9 au 11 octobre 2000, pour une réunion des personnes chargées des relations dans le domaine des longueurs au sein de l'EUROMET.

L. Robertsson s'est rendu :

- à l'Institut supérieur de technologie (Luxembourg), les 14 et 15 décembre 2000, pour une présentation intitulée « The Metre Convention; from line standards to optical clocks » ;
- au NIST et au JILA (États-Unis), du 11 janvier au 1^{er} mars 2001, et du 24 mai au 12 juin 2001, pour travailler sur le générateur de peignes du BIPM et collaborer avec le NIST et le JILA ;
- au symposium « Laser Frequency Stabilization, Standards, Measurement, and Applications », à San Jose (États-Unis), du 21 au 27 janvier 2001, pour présenter un poster intitulé « Improved iodine-stabilized Nd:YAG laser », co-signé de L.S. Ma et S. Picard, et présenter un exposé intitulé « I₂-stabilized 633 nm He-Ne lasers: 25 years of international comparisons », par J.-M. Chartier et A. Chartier (article invité) ;
- au BNM-LPTF/OP, Paris (France), le 18 mai 2001, avec S. Picard, pour des discussions.

R. Felder s'est rendu :

- à la société Fichou, Fresnes (France), le 26 juillet, le 10 octobre et le 24 novembre 2000, pour des discussions techniques sur la réalisation pratique de tubes laser ;
- à la société Stigma Optique, Montgeron (France), le 26 juillet 2000 ;
- aux Établissements Dumas, Noizay (France), le 26 août 2000, pour des discussions techniques ;
- au CNRS, Verrières (France), le 14 septembre 2000, pour des discussions techniques sur la réalisation pratique de transitions entre verres différents ;
- à la PTB, Braunschweig (Allemagne), du 28 novembre au 9 décembre 2000, pour des mesures de fréquence absolue de lasers (He-Ne)/CH₄ ;

- au BNM-LPTF/OP, Paris (France), les 8 et 20 février 2001 et le 22 mars 2001, pour transporter un laser à diode asservi sur le rubidium et pour des discussions techniques ; le 23 février 2001 et du 27 février au 2 mars 2001, puis les 3, 4, 6, 10 et 11 avril 2001, pour une comparaison de la fréquence de lasers à diode asservis sur le rubidium à $\lambda \approx 778$ nm ;
- au NMIJ/AIST (précemment dénommé NRLM), Tsukuba (Japon), du 4 au 19 mars 2001, pour une comparaison internationale de lasers à diode asservis sur le rubidium à $\lambda \approx 778$ nm.

L.F. Vitouchkine s'est rendu :

- au MIKES, IFG, Helsinki (Finlande), du 5 au 7 octobre 2000, pour présenter les travaux du BIPM dans le domaine de la nanométrie et pour des discussions sur le programme d'activités du Groupe de travail 6 de l'International Gravity and Geoid Commission (IGGC) ;
- au Centre européen de géodynamique et de sismologie (Luxembourg), les 29 et 30 janvier 2001, pour une réunion du comité d'organisation de la comparaison internationale de gravimètres absolus (ICAG 2001) ;
- au CMI, Prague (Rép. tchèque), du 12 au 15 février 2001, pour présenter les travaux du BIPM dans le domaine de la nanométrie ;
- à la société Micro-g Solutions, Table Mountain Observatory, Boulder (États-Unis), du 6 au 14 avril 2001, pour des essais du gravimètre absolu FG5-108 du BIPM après réparation ;
- à l'ILP et au VNIIM, Saint-Petersbourg (Féd. de Russie), du 23 au 26 avril 2001, pour essayer la tête laser à Nd:YVO₄/KTP modifiée ;
- à Munich (Allemagne), du 18 au 21 juin 2001, pour participer à la réunion du Groupe de travail du CCL sur la métrologie dimensionnelle et à la conférence SPIE « Laser in Metrology and Art Conservations », où il a présenté trois posters.

2.11 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.

Il participe en qualité d'expert à l'établissement de la liste de services sur les aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages de l'EUROMET.

L.F. Vitouchkine préside le groupe de discussion sur la nanométrie (DG7) du Groupe de travail du CCL 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.

2.12 Visiteurs de la section des longueurs

- Mme E. Schettino (Université de Naples, Italie), le 5 septembre 2000.
- M. F. Senotier (Laserlabs, Janville-sur-Juine, France), les 8 et 26 septembre, le 11 octobre, et les 1^{er} et 8 décembre 2000.
- M. P. Plombin (Ets. Dumas, Noizay, France), le 20 et le 29 septembre, le 19 octobre et le 16 novembre 2000, ainsi que le 12 janvier et le 12 avril 2001.
- M. Y. Millerioux* (BNM-INM), le 11 octobre 2000.
- MM. A. Goncharov (ILP, Novosibirsk), F. Duburck (BNM/LPL), J.-P. Wallerand (BNM-INM), le 9 novembre 2000.
- M. M. Têtu (Université Laval, Canada), le 17 novembre 2000.
- MM. O. Acef et E. de Clercq (BNM-LPTF/OP), le 17 novembre 2000.
- M. S. Shelkovnikov (Institut Lebedev, Moscou, Féd. de Russie), le 24 novembre 2000.
- M. L. Grédoire-Arnaiz (Chadow Productions, France), le 28 novembre 2000.
- M. J. Faller (NIST/JILA), le 5 décembre 2000.
- MM. F. Dupont et F.-X. Vaillant (BRGM), les 9 et 10 janvier 2001, pour des mesures relatives de g au point A du micro-réseau gravimétrique du BIPM.
- M. A. Medeiros de Farias Theisen (Pontifica Universidade Catolica do Rio Grande, Brésil), le 30 janvier 2001.
- M. G. Ancourt (Stigma Optique, Montgeron, France), le 20 février 2001.
- M. F. Dupont (BRGM), les 6 et 7 mars 2001, pour des mesures relatives de g au point A du micro-réseau gravimétrique du BIPM.

* Nous avons le regret de vous faire part du décès de M. Y. Millerioux, le 27 octobre 2000.

- M. M. Gubin (Institut Lebedev, Moscou, Féd. de Russie), du 21 au 23 mars 2001.
- MM. J. Ammann, M. Diament et O. Jamet (IPGP), le 29 mars 2001, pour des mesures relatives de g au point A du micro-réseau gravimétrique du BIPM.
- M. S. Ranc (Bfi Optilas, Évry, France), le 26 avril 2001.
- M. F. Guionnet (IUT d'Orsay, France), le 4 mai 2001.
- M. B. Theron (CSIR), le 10 mai 2001.
- Mme M. Marques de S. Carvalho et M. M. Oliviero Gaspar de Carvalho (Centro de Tecnologia Euvaldo Lodi, Brésil), le 10 mai 2001.
- M. G. Flaquière (Spectra-Physics, Courtaboeuf, France), le 11 mai 2001.
- M. T. Aalbers (NMI VSL), le 13 juin 2001.

2.13 Stagiaires, chercheurs associés et invités

- M. E. Petrukhin (Institut Lebedev, Moscou, Féd. de Russie), du 10 août 2000 au 31 août 2001, pour travailler avec R. Felder sur les lasers à He-Ne asservis sur le méthane à $\lambda \approx 3,39 \mu\text{m}$.
- M. O.A. Orlov (ILP, Saint-Petersbourg), du 23 septembre au 22 décembre 2000, pour participer aux essais des têtes laser à Nd:YVO₄/KTP et aux recherches sur les caractéristiques de la fréquence de ces lasers asservis sur l'iode.
- M. F.L. Hong (NMIJ/AIST, précédemment le NRLM) et M. Y. Mille-rioux (BNM-INM), du 11 au 24 octobre 2000, pour participer à une comparaison de lasers à $\lambda \approx 532 \text{ nm}$.
- M. I. Disco (OMH), du 21 au 27 octobre 2000, pour participer à l'étalonnage de la fréquence du laser étalon de l'OMH à $\lambda \approx 633 \text{ nm}$.
- Mme M. del Mar Perez Hernandez (CEM), du 23 au 27 octobre 2000, pour participer à l'étalonnage de la fréquence du laser étalon du CEM à $\lambda \approx 633 \text{ nm}$.
- M. J.-P. Wallerand (BNM-INM), du 13 novembre 2000 au 16 février 2001 pour améliorer le système à Nd:YAG du BNM-INM.
- MM. P. Balling et P. Křen (CMI), du 19 au 22 novembre 2000, pour participer aux essais de fréquence des lasers à Nd:YVO₄/KTP asservis sur l'iode.

- MM. Y.G. Zakharenko et V. Fedorine (VNIIM), du 20 au 31 mars 2001, pour participer à une comparaison de lasers à $\lambda \approx 633$ nm.
- MM. T.K. Blazhev et G.K. Veselin (NCM), du 20 au 31 mars 2001, pour participer à une comparaison de lasers à $\lambda \approx 633$ nm.
- MM. K. Nyholm (MIKES), M. Merimaa, T. Ahola (HUT), P. Balling, M. P. Křen (CMI) et J.-P. Wallerand (BNM-INM), du 7 au 23 mai 2001, pour participer à une comparaison de lasers à $\lambda \approx 532$ nm.
- Mme N. Debeglia et M. F. Dupont (BRGM), du 4 au 6 juin 2001, pour des mesures relatives de g aux points A, A2, B, B1, B3, L3, L4 du micro-réseau gravimétrique du BIPM et pour des mesures géodésiques d'altitudes de ces points.
- M. O.A. Orlov (ILP, Saint-Pétersbourg), les 30 juin et 1^{er} juillet 2001, pour participer aux essais de la tête laser modifiée à Nd:YVO₄/KTP et à la conception du laser à Nd:YVO₄/KTP/I₂ à $\lambda \approx 532$ nm.

3 **MASSES ET GRANDEURS APPARENTÉES** (R.S. DAVIS)

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

Les prototypes et étalons de 1 kg suivants en platine iridié ont été étalonnés au BIPM : les prototypes n° 36 (Norvège), n° 23 (Finlande), n° 21 (Mexique), n° 55 (Allemagne), et les étalons n° 651 et « A » du NPL. Sont en cours d'étalonnage au BIPM les prototypes n° 48 (Danemark) et n° 24 (Espagne).

Le prototype n° 55 et les étalons n° 651 et « A » sont utilisés pour une comparaison d'étalons en platine iridié de l'EUROMET. Le BIPM a étalonné ces artefacts avant le début de la comparaison et nous espérons les étalonner à nouveau après la fin de la comparaison. Le laboratoire pilote de cette comparaison de l'EUROMET est le NPL.

Compte tenu de l'intérêt accru pour ces étalonnages, nous venons de terminer une comparaison entre sept prototypes et étalons en platine iridié conservés au BIPM. Ce sont les étalons de travail du BIPM ainsi que le prototype

n° 25, d'usage exceptionnel, qui a été mesuré précédemment en 1998. Le prototype n° 25 a été soumis à la méthode de nettoyage-lavage du BIPM en décembre 1997 et nous n'envisageons pas de le nettoyer à nouveau avant 2003. D'après ces mesures, nous pouvons conclure que la plupart des étalons se comportent comme prévu. Cette étude vient de s'achever et nous envisageons d'écrire un rapport sur les résultats.

Des étalons en acier inoxydable de 1 kg ont été étalonnés pour le Justervesenet (3), pour Singapour (1) et pour le CENAM (2). De plus, quatre étalons appartenant au SMU, utilisés comme étalons voyageurs pour une comparaison de COOMET, ont été brièvement étudiés.

Les études sur la nouvelle balance Metrotec se poursuivent. Nous rappelons que l'écart-type de la balance est excellent (de l'ordre de 0,1 µg), mais la reproductibilité à ce niveau n'est obtenue que pour des masses de forme identique. De faibles effets de l'ordre de quelques microgrammes sont observés entre des masses de formes différentes. Ces effets semblent être liés à des variations de température à l'intérieur de l'enceinte de la balance (qui est placée dans une enceinte étanche), qui pourtant excèdent rarement 10 mK au cours des comparaisons. Ce comportement suggère que ces effets peuvent provenir de la convection naturelle contre laquelle nous nous préparons à installer des écrans de protection, selon les conseils du fabricant.

3.2 Balance à suspensions flexibles (A. Picard)

Le BIPM a conclu un accord officiel avec une société privée pour commercialiser la balance FB-2. Le projet est en cours et nous espérons que le premier prototype sera fabriqué au début de l'année 2003. Quant à notre balance, nous avons installé une nouvelle électronique pour remplacer les circuits d'origine. De nouveaux programmes ont été mis au point avec LabView pour remplacer ceux écrits en Turbo Pascal. La balance FB-2, qui a fonctionné de nombreuses années sans problème majeur, continue à produire des résultats très satisfaisants.

3.3 Détermination de la masse volumique de l'air par trois méthodes (A. Picard et H. Fang)

Comme nous l'avons indiqué l'année passée, l'objectif de ce travail est de comparer les performances de trois méthodes utilisées pour déterminer la masse volumique de l'air : l'application de la formule pour la détermination

de la masse volumique de l'air humide du CIPM (1981/91), la détermination directe au moyen d'objets de volumes très différents spécialement conçus pour mesurer la poussée de l'air, et la réfractométrie, qui exploite la corrélation forte entre la masse volumique et l'indice de réfraction de l'air.

Deux artefacts en acier inoxydable de masse 1 kg et de grande qualité, ayant une même surface nominale ont été fabriqués et ajustés. Leurs propriétés magnétiques ont été mesurées, la susceptibilité magnétique volumique est égale à $\chi = 0,0038$ et l'aimantation permanente est inférieure à $0,1 \mu\text{T}$. Ces propriétés sont plus que suffisantes pour nos besoins.

Nous avons aussi construit un réfractomètre hétérodyne pour déterminer l'indice de réfraction de l'air par mesure de battement de fréquence optique. Les deux artefacts et le cœur du réfractomètre, un interféromètre Fabry-Perot double, ont été placés à l'intérieur de l'enceinte de la balance FB-2, qui est équipée de dispositifs de grande exactitude pour mesurer les paramètres de l'air ambiant.

Des mesures ont été faites en alternance dans l'air et dans le vide. Les mesures dans le vide nous permettent de contrôler les éventuelles dérives à long terme de la différence de masse entre les deux artefacts et de la longueur de la cavité en zérodur de l'interféromètre. Ces effets ont été pris en compte pour la détermination de la masse volumique de l'air.

En faisant varier la pression atmosphérique ou l'humidité relative, nous provoquons une variation de la masse volumique de l'air de $1,15 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ à $1,21 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. La fraction molaire du dioxyde de carbone est mesurée au début de chaque ensemble de mesures, constitué d'une vingtaine de séries en dix jours environ. Pendant chaque série de pesées des artefacts dans l'air, la fréquence de battement optique et les paramètres de l'environnement (température, humidité et pression) ont été mesurés en continu afin de comparer la masse volumique de l'air déterminée simultanément selon les trois méthodes mentionnées ci-dessus. Pour la première série de l'ensemble des pesées dans l'air, le facteur reliant l'indice de réfraction et la masse volumique de l'air était ajusté afin que la masse volumique de l'air soit égale à celle donnée par la formule du CIPM.

La comparaison entre les trois méthodes, deux méthodes absolues et une relative, montre qu'à court terme les caractéristiques de la réponse et la répétabilité de chaque méthode sont équivalentes à quelques $10^{-6} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ près. À long terme, les deux méthodes absolues s'accordent de manière satisfaisante à $2,4 \times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ près avec une reproductibilité de $2 \times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Nous avons obtenu une incertitude-type composée relative de 7×10^{-5} pour les déterminations faites selon la formule du CIPM. Il est difficile de réduire l'incertitude de manière significative avec cette méthode en raison des limites imposées par la formule proprement dite ($6,5 \times 10^{-5}$).

En ce qui concerne la méthode fondée sur des artefacts conçus pour la détermination de la poussée de l'air, nous avons obtenu une incertitude-type composée relative de $1,4 \times 10^{-5}$ pour la masse volumique de l'air, principalement en raison de l'exactitude élevée avec laquelle nous avons pu déterminer la différence de volume entre les deux artefacts. L'incertitude est plus faible d'un facteur cinq que celle obtenue au moyen de la formule du CIPM.

En ce qui concerne la méthode de réfractométrie, l'incertitude de la détermination de la masse volumique de l'air est associée au facteur reliant la masse volumique et l'indice de réfraction de l'air. Dans notre cas, le réfractomètre a été utilisé seulement pour des mesures relatives. L'incertitude-type relative de la méthode est de l'ordre de 10^{-9} pour l'indice de réfraction, ce qui correspond à 4×10^{-6} pour la masse volumique de l'air.

Un accord satisfaisant a été obtenu au cours des huit mois pendant lesquels les mesures ont été faites. La cohérence à court et long terme entre les trois méthodes est telle que la masse volumique de l'air peut être déterminée à quelques $10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ près.

Comme la balance FB-2 permet de mesurer aisément des masses additionnelles, nous concluons qu'il est possible d'utiliser directement des artefacts conçus pour la détermination absolue de la poussée de l'air, artefacts qui demandent peu de maintenance et fournissent une exactitude élevée. Cette méthode peut également être utilisée pour vérifier de temps à autre la validité de l'application de la formule du CIPM. Conjointement à l'une des deux méthodes absolues, la méthode optique peut être utilisée pour suivre avec une grande sensibilité les petites variations de masse volumique de l'air dans l'enceinte de la balance pendant une pesée.

3.4 **Mesure de l'indice de réfraction de l'air avec un nouveau réfractomètre** (H. Fang et A. Picard)

Comme les mesures mentionnées ci-dessus demandaient la construction d'un nouveau réfractomètre fonctionnant à 780 nm, nous en avons profité pour déterminer en parallèle l'indice de réfraction de l'air afin de le comparer aux formules d'Edlén. Des mesures périodiques dans le vide ont été utilisées pour

évaluer le comportement à court et à long terme de l'interféromètre Fabry-Perot. Nous pouvons raisonnablement supposer que la dérive en fonction du temps et les variations en fonction de la température de la longueur de la cavité de l'interféromètre proviennent de changements mécaniques. Le coefficient de dilatation linéaire thermique observé est de $3 \times 10^{-8}/^{\circ}\text{C}$ avec une contraction relative à long terme de $2,2 \times 10^{-8}$ par an (en valeurs relatives). Grâce à des mesures exactes des paramètres ambiants, nous avons pu appliquer les formules d'Edlén révisées au niveau de 10^{-8} . La différence moyenne entre l'indice de réfraction de l'air mesuré avec notre réfractomètre et celui dérivé des formules d'Edlén, révisées par Birch et Downs, est de -4×10^{-8} (avec un écart-type de 1×10^{-8}) et de -2×10^{-8} par comparaison avec la formule proposée par Bönsch et Potulski. Ces mesures confirment le fait que le décalage systématique d'environ $-1,6 \times 10^{-7}$ observé lors de précédentes mesures effectuées par Hao Fang au BNM-INM/CNAM provient principalement des gradients de température et d'humidité relative entre les emplacements des instruments de mesure et de l'interféromètre Fabry-Perot. La validité des formules révisées d'Edlén pour la détermination de l'indice de réfraction de l'air à une longueur d'onde de 780 nm a été vérifiée expérimentalement avec une incertitude relative de l'ordre de 10^{-8} .

3.5 Balance hydrostatique

(C. Goyon-Taillade, L.F. Vitouchkine et R.S. Davis)

Nous vous rappelons que le système comporte deux enceintes de pesée, l'enceinte supérieure étant toujours en atmosphère ambiante. L'enceinte inférieure sert habituellement à immerger la masse dans un bain hydrostatique thermostaté mais elle peut aussi fonctionner dans l'air pour des essais.

Depuis l'an dernier nous avons effectué les opérations suivantes : La nouvelle balance hydrostatique a été entièrement équipée pour le contrôle de la température, de la pression et de l'humidité relative dans l'air ainsi que pour celui de la température dans le bain hydrostatique. Un système de purification automatisé produisant de l'eau bi-distillée a été installé et est en fonctionnement. Un appareil conçu pour traiter le fil de suspension afin de réduire les effets de la tension superficielle à l'interface air-eau a été élaboré et vérifié, et il est entièrement opérationnel. Une technique a été mise au point pour éliminer les bulles quand les échantillons sont immergés dans le bain hydrostatique ; les tests visuels confirment l'absence de bulles.

Des comparaisons de masses entre des étalons placés dans l'enceinte supérieure de la balance ont été réalisées avec succès. L'écart-type des mesures est comparable à la sensibilité de la balance. Des comparaisons de masses dans l'air entre des étalons placés dans les enceintes supérieure et inférieure ont aussi donné des résultats satisfaisants. Nous poursuivons activement notre objectif final qui est de comparer des étalons de masse dans l'air (enceinte supérieure) et des étalons ou des masses inconnues placées dans le bain hydrostatique (enceinte inférieure). Nous avons effectué ces mesures, mais les résultats ne sont pas encore satisfaisants.

Dans le cadre d'un autre projet, R.S. Davis a mis au point une balance hydrostatique pour mesurer de petites différences entre des échantillons de même masse volumique nominale. Ce travail a été mené en collaboration avec l'université de Birmingham : une étudiante de cette université a utilisé ces données. Le même appareil a été utilisé pour vérifier les gradients de masse volumique des masses source et d'essai utilisées pour les mesures de G au BIPM.

3.6 Balance de torsion pour la mesure de G (T.J. Quinn, C.C. Speake* et A. Picard ; J. Hostache)

Une des étapes majeures de notre travail sur la détermination de la constante gravitationnelle newtonienne, G , est maintenant terminée et un article a été soumis pour publication. Il y a un an, nous avons fait part d'un problème relatif au système d'asservissement électrostatique : les résultats obtenus avec ou sans asservissement présentaient une incertitude relative d'environ 1×10^{-4} alors qu'ils différaient d'environ 3×10^{-4} . Le problème a été identifié et résolu en remplaçant le système d'asservissement conventionnel en courant continu par un système de contrôle en courant alternatif fonctionnant à la même fréquence que le pont de capacité utilisé pour étalonner le servo-capteur. Après des efforts considérables, nous avons obtenu une incertitude relative inférieure à 1×10^{-4} pour les mesures asservies en alternatif et pour celles sans asservissement ; de plus, les résultats respectifs sont en accord dans les limites de l'incertitude.

Un résultat publié récemment par Gundlach et Merkowitz (Université de Washington, États-Unis), annonçant une incertitude plus faible que la nôtre, diffère de manière significative (environ 2×10^{-4}) de la valeur que nous avons obtenue. Nous sommes donc intéressés à améliorer encore nos

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

résultats. Nous envisageons pour cela de monter un nouvel appareil en vue de réduire nos incertitudes au niveau de 1×10^{-5} . Un chercheur associé viendra renforcer notre équipe en août 2001 pour une période de deux ans afin de travailler sur ce projet.

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

Compte tenu de l'importance de la détermination des propriétés magnétiques des étalons de masse en acier inoxydable, nous avons participé à une comparaison d'étalons de valeur nominale comprise entre 1 kg et 1 g. Les autres participants étaient le METAS, la PTB, le SP et Mettler-Toledo AG. Ce dernier laboratoire a fourni les pièces d'essai pour la comparaison. Tous les participants ont utilisé un nouveau type de magnétomètre, mis au point au BIPM, pour mesurer la susceptibilité magnétique de chaque pièce d'essai et étudier l'aimantation rémanente éventuelle. Des résultats cohérents ont été obtenus entre les participants, il semble que le « susceptomètre du BIPM » est capable de satisfaire les besoins de base de la métrologie des masses dans ce domaine.

Tel qu'il a été conçu à l'origine, le susceptomètre du BIPM était destiné d'abord à déterminer les propriétés magnétiques d'étalons en acier inoxydable de 1 kg. Avec nos collègues du KRISS, nous avons examiné soigneusement les problèmes annexes qui peuvent se poser quand on mesure des étalons de masse bien plus petits (par exemple 1 g). En bref, la composante de l'incertitude relative de type B augmente pour les petits échantillons, mais cette augmentation reste tolérable. Nos conclusions seront présentées en septembre 2001 à la réunion de l'IMEKO TC3, à l'UME.

3.8 Contamination de surface des étalons de masse mesurés par ellipsométrie (H. Fang, A. Picard et R.S. Davis)

L'inévitable contamination de surface des étalons de masse a des conséquences importantes sur la métrologie des masses. L'ellipsométrie offre une technique de mesure très sensible et efficace pour contrôler les variations de la couche superficielle. La méthode fait la liaison entre les changements superficiels et les variations de polarisation de la lumière réfléchie à la surface de l'étalon étudié. Notre ellipsomètre, livré en décembre 1999, fonctionne par modulation de phase grâce à un élément biréfringent.

Les mesures seront faites dans un environnement contrôlé (azote, air ou vide) pour évaluer, par exemple, les effets de l'adsorption et de la contamination. À cet effet, l'atelier de mécanique du BIPM a fabriqué une enceinte sous vide. Les mesures dans le vide serviront de référence aux études sur l'adsorption.

Pour le moment, nous avons procédé à des ajustements et à une étude préliminaire de la répétabilité. Nous continuerons les essais du système par des mesures sur un matériau de référence certifié acheté au NIST. À partir des travaux effectués à la PTB, nous envisageons de déterminer l'absorption de vapeur d'eau par les étalons de masse en fonction de l'humidité relative et de comparer les résultats avec ceux obtenus par gravimétrie et par comparaisons de masses. Une étude de la contamination de surface en fonction du temps à court terme et à long terme est aussi envisagée.

3.9 Mesure de la fraction molaire de la vapeur d'eau dans l'air (A. Picard)

Nous n'avons pas effectué de mesures cette année, mais l'analyseur de gaz a été modifié pour résoudre les problèmes d'instabilité observés l'an passé. Une fuite dans le circuit d'étalonnage a été décelée et réparée. La sensibilité anormale de l'instrument à la pression ambiante constitue un problème supplémentaire. Par conséquent, la réponse de l'instrument lors de l'étalonnage et lors de son utilisation ultérieure n'est pas exactement la même. Cette étude sera poursuivie en 2001.

3.10 Pression (A. Picard)

Depuis novembre 2000, la section des masses est responsable des étalonnages de pression. Par conséquent, tous les deux mois plusieurs jauges sont étalonnées avec le manobaromètre du BIPM.

3.11 Publications, conférences et voyages : section des masses

3.11.1 Publications extérieures

1. Clarkson M.T., Davis R.S., Sutton C.M., Coarasa J., Determination of volumes of mass standards by weighings in air, *Metrologia*, 2001, **38**, 17-23.

2. Shiomi S., Davis R.S., Speake C.C., Gill D.K., Mester J., Measurement of density inhomogeneities in HIPed beryllium and niobium for STEP test masses, *Classical and Quantum Gravity*, 2001, **18**, 2533-2541.

3.11.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

R.S. Davis s'est rendu :

- à l'International School of Physics « Enrico Fermi », Course CXLVI, Recent Advances in Metrology and Fundamental Constants, Varenna (Italie), du 25 juillet au 4 août 2000, comme enseignant à l'école d'été ;
- à Vienne (Autriche), du 25 au 28 septembre 2000, pour assister au XVI^e IMEKO World Congress et pour participer à une réunion du Groupe de travail du CCM sur les étalons de masse le 27 septembre ;
- au BNM-LNE, Paris (France), le 10 octobre 2000, accompagné des autres membres de la section des masses, pour voir les équipements d'étalonnage du point de rosée ;
- au NPL, Teddington (Royaume-Uni), les 12 et 13 octobre 2000, pour assister à une réunion des présidents des groupes de travail du CCM ;
- au CENAM, Querétaro (Mexique), du 13 au 17 novembre 2000, à l'invitation du CENAM, pour travailler avec leur personnel et présenter un exposé intitulé « Recent investigations toward the redefinition of the kilogram », à la Mexican Academy of Engineering, à Mexico (le 17 novembre) ;
- au NIST, Gaithersburg (États-Unis), du 20 au 22 novembre 2000, pour discuter des progrès récents de l'expérience sur la balance du watt au NIST et voir les programmes du NIST dans le domaine des mesures de fluides ;
- à l'université de Strathclyde, Glasgow (Écosse, Royaume-Uni), le 8 décembre 2000, pour examiner une demande de subvention sur des essais dans l'espace du principe d'équivalence des forces faibles (le voyage et l'hébergement ont été remboursés par le Paul Fund) ;
- à l'IPQ, Lisbonne (Portugal), du 19 au 23 février 2001, pour une réunion des personnes chargées des relations dans le domaine des masses de l'EUROMET (accompagné d'A. Picard) ;
- à Lisbonne (Portugal), le 20 février 2001, pour une réunion des participants d'une comparaison internationale sur les propriétés magnétiques d'étalons de masse en acier inoxydable.

H. Fang s'est rendue :

- à l'International School of Physics « Enrico Fermi », Course CXLVI, Recent Advances in Metrology and Fundamental Constants, Varenna (Italie), du 25 juillet au 4 août 2000 ;
- au BNM-INM/CNAM, Paris (France), le 9 octobre 2000 pour des discussions techniques avec P. Juncar.

J. Coarasa s'est rendue à l'IPQ, Lisbonne (Portugal), du 23 au 27 octobre 2000, pour familiariser le personnel de l'IPQ à la balance Mettler HK 1000MC et à son utilisation pour l'étalonnage d'étalons de masse de 1 kg en acier inoxydable par comparaison au prototype national en platine iridié.

3.12 Activités liées au travail des Comités consultatifs

R.S. Davis est secrétaire exécutif du CCM et du Groupe de travail *ad hoc* sur la viscosité.

3.13 Visiteurs de la section des masses

- M. D. Beaglehole (Beaglehole Instruments), le 3 juillet 2000.
- MM. I. Robinson et G. Torr (NPL), le 28 février 2001.
- MM. G. Genevès (BNM-LCIE), P. Pinot et M. Lecollinet (BNM-INM/CNAM), le 6 mars 2001.
- M. G. La Piana (IMGC), les 22 et 23 mars 2001.
- M. Ed. Williams (NIST), le 6 juin 2001.
- M. J. Gundlach (Université de Washington, Seattle), le 14 juin 2001.
- M. G. Mattingly (NIST), le 25 juin 2001.

3.14 Chercheurs invités

- M. C. Speake (Université de Birmingham), du 15 juin au 30 juillet 2000, du 14 au 18 août 2000, et du 9 au 13 avril 2001.
- Mlle S. Shiomi (Université de Birmingham), du 6 au 23 août 2000.
- M. H. Parks (JILA), du 9 au 13 avril 2001.
- M. F. Guionnet (IUT d'Orsay), du 2 avril au 22 juin 2001.
- M. J. Nava Martínez (CENAM), du 9 au 30 mai 2001.

4 TEMPS (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 2000 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 (2000)*, volume 13 [26].

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 et le TAI en temps quasi-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. La valeur limite supérieure du poids des horloges fixée à 7×10^{-3} pour le calcul du TAI n'est plus appropriée car elle ne permet pas une discrimination efficace entre les meilleures horloges. Une nouvelle façon de fixer la limite supérieure du poids des horloges pour le calcul du TAI est utilisée depuis janvier 2001. Un rapport a été soumis à ce sujet au Groupe de travail du CCTF sur le TAI. La valeur du poids relatif maximal est maintenant fixée à $2/N$, où N est le nombre total d'horloges participant au TAI. Il a été montré, à l'aide de données d'horloges réelles relevées pendant une période de deux ans et demi qu'un tel choix du poids relatif maximal engendre une meilleure discrimination entre les horloges et améliore la stabilité de l'échelle de temps

ainsi calculée. Nous pouvons donc espérer une amélioration de la stabilité de l'EAL dans un proche avenir.

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 1999 à juin 2001.

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 [15]. Depuis août 2000, huit étalons primaires de fréquence ont délivré des mesures ponctuelles de la fréquence du TAI, dont deux fontaines à césium (NIST-F1 et PTB CSF1). Le BIPM a collaboré avec la PTB à la publication des comparaisons bilatérales avec le TAI. Il en a résulté des rapports rédigés conjointement par la PTB et le BIPM, rapports maintenant soumis à publication [5].

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 août 2000, de $+0,5 \times 10^{-14}$ à $+0,7 \times 10^{-14}$, avec une incertitude-type de $0,2 \times 10^{-14}$. Nous nous efforçons de réduire cet écart sans altérer la stabilité du 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. Des comparaisons de temps par aller et retour sur satellite sont aussi 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 [$UTC - \text{temps du GPS}$] et [$UTC - \text{temps du GLONASS}$] 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. Pour toutes les liaisons par le GPS, les données sont corrigées pour tenir compte des mesures ionosphériques de l'IGS [24], et les positions des satellites déduites des éphémérides précises des satellites, calculées après coup par l'IGS.

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 d'horloges 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 Groupe de travail du CCTF sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant les systèmes de navigation par satellite à couverture globale (CGGTTS). Il a récemment contribué à l'élaboration de directives techniques destinées aux fabricants de récepteurs du temps de systèmes de navigation par satellite à couverture globale. Un membre du personnel du BIPM assure le secrétariat de ce groupe.

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. 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. De plus, des procédures ont été établies pour utiliser le code P des récepteurs à canaux multiples du GLONASS et des éphémérides précises des satellites du GLONASS.

4.3.2 Mesures de phase

Les comparaisons de temps et de fréquences 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 fréquences.

Les études fondées sur un récepteur du GPS Ashtech Z12-T en service au BIPM se poursuivent. Une méthode a été mise au point pour effectuer des étalonnages absolus des retards du récepteur Z12-T et des étalonnages différentiels de récepteurs similaires [16, 17, 20]. L'U.S. Naval Research Laboratory (NRL) a effectué deux étalonnages absolus du récepteur Z12-T en mai-juin 2000 et avril-mai 2001, et les résultats sont en cours de comparaison. Une campagne d'étalonnages différentiels de tous les récepteurs similaires en fonctionnement dans des laboratoires de temps du monde entier a débuté en janvier 2001. Un récepteur du GPS et du GLONASS JPS Legacy, acheté en l'an 2000, est aussi comparé au BIPM avec le récepteur Z12-T. Ces études sont menées dans le cadre du projet pilote IGS/BIPM visant à 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. L'expérience s'est achevée en 1999, puis a été poursuivie dans le cadre de l'International GLONASS Service Pilot Project (IGLOS-PP) sous les auspices de l'IGS, projet auquel le BIPM participe et dont le but est, entre autres, de produire après coup des éphémérides précises des satellites du GLONASS.

4.3.3 Comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite

Deux réunions sur les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite ont eu lieu depuis octobre 2000. Le BIPM effectue la collecte des résultats de comparaisons d'horloges par aller et retour de sept stations en activité et traite certaines liaisons [4]. Cinq liaisons par aller et retour ont été introduites dans le calcul du TAI, et six autres se préparent à l'être. Le BIPM participe aussi à l'étalonnage de liaisons horaires par aller et retour sur satellite par comparaison avec le GPS. La section du temps du BIPM continue à produire des rapports sur les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite et un membre du personnel du BIPM assure le secrétariat du Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite.

4.4 Pulsars (G. Petit)

Les pulsars-milliseconde pouvant fournir un moyen de contrôler la stabilité à très long terme du temps atomique, nous poursuivons notre collaboration avec différents groupes de radio-astronomes qui font des observations de pulsars et en analysent les résultats. La section du temps a fourni à ces groupes sa réalisation en temps différé du temps terrestre TT (BIPM2000). Nous continuons à collaborer avec l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP), à Toulouse, pour compléter le traitement d'un programme restreint d'observations effectuées au cours de ces dernières années [22].

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 (JCR) collabore sur des questions relatives aux systèmes de référence spatio-temporels et la relativité en astronomie, dans le cadre du Groupe de travail de l'UAI sur la relativité en mécanique céleste et en astrométrie (IAU Working Group on Relativity for Celestial Mechanics and Astrometry, RCMA). Un site Web (<http://www.bipm.org/WG/CCTF/JCR>) donne des informations générales sur ce Comité mixte et ses principales activités. Après discussion au cours du colloque 180 de l'UAI en mars 2000 [18], le rapport du JCR a été présenté à la 24^e assemblée générale de l'UAI en août 2000. Les résolutions préparées par le JCR ont été adoptées comme Résolution B1.5 « Extension du cadre

relativiste pour les transformations de temps et pour la réalisation des temps-coordonnée dans le système solaire », et Résolution B1.9 « Redéfinition du temps terrestre TT ». L'adoption de ces nouvelles résolutions par l'UAI répond à une part importante des objectifs originels du JCR dans le domaine du temps et des fréquences. Le BIPM et l'UAI ont donc décidé en janvier 2001 de mettre fin aux activités du Comité mixte et de continuer à collaborer dans le cadre du groupe de travail sur le RCMA, renommé RCMAM (où le « M » final fait référence à la métrologie).

L'uniformité dans la définition des systèmes de référence spatiaux prend de plus en plus d'importance pour la métrologie fondamentale. Cette uniformité est essentielle pour les activités qui reposent sur des ensembles de mesures qui ne peuvent être considérées comme locales, 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 participe avec l'USNO aux activités du Conventions Product Center de l'IERS depuis le 1^{er} janvier 2001. Mme E.F. Arias collabore avec l'IERS [1, 9, 10, 23] et l'Observatoire de La Plata (Argentine) [7, 8] à des activités liées à la réalisation des systèmes de référence célestes et aux séries de paramètres sur la rotation terrestre.

4.6 Autres études (P. Wolf)

En collaboration avec le BNM-LPTF/OP, 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 microgravité, 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 présentent donc un intérêt primordial pour établir l'exactitude du TAI. Nous avons effectué, en collaboration avec l'Observatoire de Paris et l'École normale supérieure (ENS), le calcul théorique complet des corrections relativistes qui affectent les horloges elles-mêmes et les comparaisons entre les horloges situées dans l'espace et à terre, et nous en avons publié les résultats [6].

Plus généralement, les nombreuses activités dans le domaine de l'interférométrie atomique fondée sur des 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/OP pour travailler sur un projet financé par le Centre national d'études spatiales (CNES), dans le but d'étudier les applications éventuelles de cette technique à la physique fondamentale et à la métrologie. La première étude concernait la possibilité de détecter des ondes gravitationnelles avec un gyroscope dans l'espace fondé sur l'interférométrie atomique. Les résultats (publiés partiellement) montrent qu'il est peu probable de pouvoir détecter de telles ondes, compte tenu de l'état actuel et à venir de la technologie. La majeure partie de ce travail de collaboration a été par la suite consacrée à la recherche d'effets systématiques dans les étalons primaires de fréquence, effets dus à la quantification des états externes des paquets d'ondes atomiques provenant du recul micro-onde. Des calculs d'un simple ordre de grandeur montrent que ces effets devraient donner lieu à des décalages de fréquence relative d'au moins 1×10^{-16} et pouvant atteindre 1×10^{-15} pour une puissance hyperfréquence plus élevée, du même ordre de grandeur que l'incertitude des meilleurs étalons de fréquence actuels. Cependant, des calculs théoriques plus complets et une simulation numérique montrent que ces décalages s'annulent en grande partie en raison de l'interférence entre les multiples ondes atomiques dans des champs hyperfréquences stationnaires. La même théorie prédit un effet observable relatif au contraste de la figure d'interférences (franges de Ramsey) dans certaines conditions. Des expériences sont en cours au BNM-LPTF/OP pour vérifier ces prédictions qui justifieraient expérimentalement de négliger les corrections provenant des effets de recul dans l'évaluation de la fréquence des meilleurs étalons primaires de fréquence.

4.7 Publications, conférences et voyages : section du temps

4.7.1 Publications extérieures

1. Arias E.F., Gontier A.-M., Souchay J., Celestial Reference System and Frame, *IERS Annual Report for 1999*, Observatoire de Paris, 2000, 83–101.
2. Arias E.F., Definition and realization of TAI, *Journées 2000 Systèmes de Référence Spatio-temporels*, Observatoire de Paris, 2001, 214-217.

3. Azoubib J., A revised way of fixing an upper limit to clock weights in TAI computation, *Proc. 32nd PTTI*, 2001, 195-209.
4. Azoubib J., Lewandowski W., Time links for the construction of TAI, *Proc. 32nd PTTI*, 2001, 181-194.
5. Bauch A., Fisher B., Heindorff T., Hetzel P., Petit G., Schröder R., Wolf P., Comparisons of PTB's primary clocks with TAI in 1999, *Metrologia*, 2000, **37**, 683-692.
6. Blanchet L., Salomon C., Teyssandier P., Wolf P., Relativistic theory for time and frequency transfer to order c^{-3} , *Astron. Astrophys.*, 2001, **370**, 320-329, et gr-qc/0010108.
7. Cionco R.G., Arias E.F., Orellana R.B., Vucetich H., A comparison of the SAO-Hipparcos reference frames, *Astron. Astrophys.*, 2000, **359**, 1195-1200.
8. De Biasi M.S., Arias E.F., Sensitivity of the arclength method of reduction of VLBI astrometric data to some astrometric models, *Journées 2000 Systèmes de Référence Spatio-temporels*, Observatoire de Paris, 2001, 56-58.
9. Fernández L.I., Gambis D., Arias E.F., Weighted Combination of LOD values as splitted into frequency windows, *Journées 1999 Systèmes de Référence Spatio-Temporels & IX Lohrmann-Kolloquium*, 2000, 173-176.
10. Fernández L.I., Gambis D., Arias E.F., Combination procedure for length-of-day time series according to the noise frequency behavior, *J. Geodesy*, 2001, **75**, 276-282.
11. Jiang Z., Petit G., Wolf P., IGS products and accurate time-frequency transfer, *ATF 2000 Proceedings, Asia-Pacific Workshop on Time and Frequency*, 2001, 100-106.
12. Lewandowski W., Azoubib J., Time Transfer and TAI, *Proc. IEEE/EIA Int. Frequency Control Symposium*, 2000, 586-597 (papier invité).
13. Lewandowski W., Report on the 8th meeting of the BIPM working group on Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer, *Proc. 32nd PTTI*, 2001, 229-233.

14. Lewandowski W., Nawrocki J., Azoubib J., First use of IGEX precise ephemerides for intercontinental GLONASS P-code time transfer, *J. Geodesy*, **75**, 620-625.
15. Petit G., Use of primary frequency standards for estimating the duration of the scale unit of TAI, *Proc. 31st PTTI*, 2000, 297.
16. Petit G., Jiang Z., Uhrich P., Taris F., Differential calibration of Ashtech Z12-T receivers for accurate time comparisons, *Proc. 14th EFTF*, 2000, 40.
17. Petit G., Jiang Z., White J., Beard R., Powers E., Absolute calibration of Ashtech Z12-T GPS receiver, *GPS Solutions*, 2001, **4** (4), 41.
18. Petit G., Report of the BIPM/IAU Joint Committee on Relativity for space-time reference systems and metrology, *Proc. IAU Colloquium 180*, 2000, 275.
19. Petit G., Terrestrial timescales, *Enc. Astron. Astrophys.*, IOP Pub., 2001, **4**, 3315-3319.
20. Petit G., Jiang Z., Moussay P., White J., Powers E., Dudle G., Uhrich P., Progresses in the calibration of geodetic type GPS receiver for accurate time comparisons, *Proc. 15th EFTF*, 2001, 164-166.
21. Ray J., Arias E.F., Petit G., Springer T., Schildknecht T., Clarke J., Johansson J., Progress in carrier Phase Time Transfer, *GPS Solutions*, 2001, **4**(4), 47-54.
22. Rougeaux B., Petit G., Fayard T., Davoust E., Experimental set-up for detecting very fast and dispersed millisecond pulsars, *Exp. Astron.*, 2000, **10**, 473.
23. Souchay J., Gontier A.-M., Arias E.F., The ICRS: concept, realization, accessibility and maintenance, *Journées 1999 Systèmes de Référence Spatio-Temporels & IX Lohrmann-Kolloquium*, 2000, 3-7.
24. Wolf P., Petit G., Use of IGS ionosphere products in TAI, *Proc. 31st PTTI*, 1999, 419-428.
25. Wolf P., Bize S., Clairon A., Landragin A., Laurent P., Lemonde P., Bordé C.J., Recoil effects in microwave atomic frequency standards: preliminary results, *Proc. FCS and PDA Exhibition*, 2001, 37-45.

4.7.2 Publications du BIPM

26. *Rapport annuel de la section du temps du BIPM (2000)*, 2001, **13**, 97 p.
27. *Circulaire T* (mensuelle), 6 p.
28. *BIPM TWSTFT Reports*, 19 p.

4.7.3 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

E.F. Arias s'est rendue à :

- Manchester (Royaume-Uni), du 8 au 16 août 2000, pour la 24^e assemblée générale de l'UAI ;
- Francfort (Allemagne), les 14 et 15 septembre 2000, pour une réunion du Conseil de l'IERS ;
- Paris (France), les 18 et 19 septembre 2000, pour les Journées 2000 Systèmes de référence spatio-temporels, à l'Observatoire de Paris, pour un exposé intitulé « Definition and realization of TAI » ;
- Washington DC (États-Unis), les 25 et 26 septembre 2000, pour l'IGS Analysis Centre Workshop ;
- Turin (Italie), le 20 novembre 2000, pour le 125^e anniversaire de la Convention du Mètre, et un exposé intitulé « The future of the SI and the role of fundamental constants » ;
- New Delhi (Inde), les 6 et 7 février 2001, à l'International Conference on Time and Frequency, pour un exposé intitulé « Time transfer methods in TAI: present and future » ; du 8 au 10 février 2001, à la 3^e International Conference on Metrology in New Millennium and Global Trade, pour un exposé intitulé « Through the globalization of world standards » ;
- Neuchâtel (Suisse), du 6 au 8 mars 2001, pour le 15^e EFTF ;
- Paris (France), le 14 mai 2001, pour un exposé à l'Observatoire de Paris.

J. Azoubib s'est rendu à :

- Genève (Suisse), du 9 au 13 octobre 2000, pour une réunion du Working Party 7A du Groupe d'étude 7 de l'UIT, et du 3 au 11 mai 2001, pour une réunion du Special Rapporteur Group sur l'avenir de l'UTC et du Working Party 7A du Groupe d'étude 7 de l'UIT ;

- Reston (Virginie, États-Unis), du 27 au 30 novembre 2000, pour une réunion des laboratoires qui participent au Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite, pour le forum sur la normalisation du GPS et du GLONASS organisée par le Sous-groupe de travail du CCTF sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS et le GLONASS et pour un exposé à la 32^e réunion du PTTI.

W. Lewandowski s'est rendu :

- à Reston (Virginie, États-Unis), du 28 au 30 octobre 2000, pour la 32^e réunion du PTTI, et pour un exposé sur la normalisation éventuelle des équipements au forum sur la normalisation du GPS et du GLONASS organisée par le Sous-groupe de travail du CCTF sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS et le GLONASS ;
- au GUM, Varsovie (Pologne), du 19 au 22 décembre 2000, pour une réunion sur la coordination des laboratoires de temps polonais ; du 15 au 18 mai 2001, pour discuter de l'établissement de l'échelle de temps atomique polonaise ;
- à Neuchâtel (Suisse), les 5 et 6 mars 2001, pour une réunion des laboratoires qui participent au Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons d'horloges par aller et retour sur satellite ;
- à Arlington (Virginie, États-Unis), du 27 au 29 mars 2001, pour la 37^e réunion du Civil GPS Service Interface Committee; en qualité de président du sous-comité sur le temps ;
- à Boulder (Colorado, États-Unis), du 2 au 4 avril 2001, pour travailler à l'établissement de directives techniques à l'intention des fabricants de récepteurs utilisés dans le domaine du temps.

G. Petit s'est rendu à :

- Noordwijk (Pays-Bas), le 8 août 2000, le 16 novembre 2000 et les 27 et 28 février 2001, pour des réunions du Galileo Time Interface Working Group ;
- Manchester (Royaume-Uni), du 10 au 16 août 2000, pour un exposé intitulé « Report of the BIPM/IAU Joint Committee on Relativity for reference systems and metrology » à la 24^e assemblée générale de l'UAI ;
- Marne-la-Vallée (France), les 2 et 3 novembre 2000, pour l'atelier ITRF 2000 ;

- San Francisco (États-Unis), du 17 au 19 décembre 2000, pour la réunion d'automne de l'AGU 2000 et une réunion du conseil de direction de l'IERS ;
- Neuchâtel (Suisse), du 6 au 8 mars 2001, pour un exposé au 15^e EFTF intitulé « Progress in the calibration of geodetic type GPS receiver for accurate time comparisons » ;
- Nice (France), les 29 et 30 mars 2001, invité pour un exposé à la 26^e assemblée générale de l'EGS intitulé « Conventions and models in space-time reference systems » ;
- Toulouse (France), les 21 et 22 mai 2001, invité pour une conférence au CNES.

P. Wolf s'est rendu à :

- Paris (France), du 1^{er} mai 2000 au 30 avril 2001, pour un stage d'un an au BNM-LPTF/OP ;
- Varenna (Italie), du 25 juillet au 4 août 2000, invité à présenter deux cours à l'International School of Physics « Enrico Fermi », Course CXLVI, Recent Advances in Metrology and Fundamental Constants, intitulés « Relativity and metrology » et « Relativity with clocks in space » ;
- Grasse (France), du 11 au 13 octobre 2000, pour les Journées du GREX (Groupe de recherche du CNRS : gravitation et expériences) ;
- Paris (France), les 18 et 19 janvier 2001, pour les Journées scientifiques de l'ONERA : missions spatiales en physique fondamentale ;
- Seattle (États-Unis), du 6 au 8 juin 2001, pour un exposé au FCS 2001 intitulé « Recoil effects in microwave atomic frequency standards: preliminary results ».

Z. Jiang s'est rendu à :

- Washington DC (États-Unis), du 24 au 28 septembre 2000, pour un exposé à l'IGS Analysis Centres Workshop intitulé « Absolute calibration of Ashtech Z12-T GPS receiver » ;
- Tokyo (Japon), du 28 octobre au 3 novembre 2000, pour un exposé à l'ATF Asia-Pacific Workshop on Time and Frequency intitulé « IGS products and accurate time-frequency transfer » ;
- Xi'an (Chine), du 6 au 11 novembre 2000, pour visiter le CSAO.

4.8 Activités en liaison avec des organisations extérieures

E.F. Arias est membre de l'UAI et participe à trois de ses groupes de travail sur la nutation, sur le système de référence céleste international (ICRF) et sur la redéfinition de l'UTC. Depuis janvier 2001, elle est membre de l'International Celestial Reference System Product Centre et du Conventions Product Centre de l'IERS. Elle est membre de l'International VLBI Service (IVS), et de son groupe de travail sur l'analyse de l'ICRF. Elle est co-présidente du projet pilote IGS/BIPM sur l'étude des comparaisons exactes de temps et de fréquence utilisant les mesures de phase et de code du GPS. Elle est membre de l'Argentine Council of Research (CONICET) et astronome associée au Département d'astronomie fondamentale (DANOF, Observatoire de Paris). Depuis janvier 2001, elle est correspondante du Bureau des longitudes.

J. Azoubib représente le BIPM au Working Party 7A du Groupe d'étude 7 de l'UIT.

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 président de la Commission 31 sur le temps ; il fut président du Comité mixte BIPM/UAI sur les systèmes de référence spatio-temporels et la métrologie dans le cadre de la relativité générale jusqu'à sa dissolution en janvier 2001. Il est co-directeur du Conventions Product Centre de l'IERS depuis le 1^{er} janvier 2001. Il est membre du Comité national français de géodésie et géophysique.

P. Wolf est membre du RCMAM et du GREX.

4.9 Activités liées au travail des Comités consultatifs

E.F. Arias est secrétaire exécutive du CCTF.

J. Azoubib est membre du Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite.

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.

4.10 Visiteurs de la section du temps

- M. J. Nawrocki (AOS), décembre 2000 et du 20 au 22 juin 2001.
- M. J. Canny (président du Civil GPS Service Interface Committee, U.S. Dept. of Transport), le 21 mai 2001.
- M. P. Banerjee (NPLI), du 22 au 26 juin 2001.

5 ÉLECTRICITÉ (T.J. WITT)

5.1 Potentiel électrique : effet Josephson (D. Reymann)

5.1.1 Mesures de réseaux de jonctions de Josephson

Nous avons effectué cette année une comparaison directe entre les deux étalons du BIPM de 10 V à effet Josephson, en utilisant pour l'un des étalons un réseau de la PTB et pour l'autre un réseau Hypres. Des mesures préliminaires ont été réalisées en utilisant le détecteur aux sensibilités pleine échelle de 3 μV et de 1 μV . Ensuite, pendant une période de quatre jours, nous avons effectué 166 déterminations de la différence entre les tensions de sortie, à la sensibilité pleine échelle de 0,3 μV . La différence moyenne était de 30 pV avec un écart-type de la moyenne de 40 pV.

5.1.2 Projet 429 de l'EUROMET (EUROMET.EM-K11) : comparaison d'étalons de tension de 10 V

Le BIPM continue à participer au projet 429 de l'EUROMET (*voir* rapport du directeur de 1999). Il s'agit d'une comparaison d'étalons de 10 V entre une vingtaine de laboratoires nationaux de métrologie, au moyen de quatre étalons voyageurs à diode de Zener. Le BIPM a procédé à une vérification supplémentaire des étalons voyageurs en les mesurant à cinq occasions ; la dernière série de mesures a été effectuée en novembre et décembre 2000.

5.1.3 Comparateur pour les mesures de diodes de Zener

La technique utilisant un réseau de jonctions de Josephson à 10 V pour étalonner le comparateur 1,018 V-10 V nous a permis de mettre en évidence

de petites variations anormales. Celles-ci étaient liées à une lente dégradation des contacts série-parallèle. Après remplacement des contacts, les mesures faites avec le comparateur étaient en accord avec celles faites avec le réseau à 1×10^{-8} près.

5.2 Résistance électrique et impédance (F. Delahaye)

5.2.1 Mesures de résistance en courant continu (F. Delahaye ; A. Jaouen)

Nous avons mesuré cette année les coefficients de pression de six étalons de résistance de 10 k Ω du BIPM (Teegam SR104) destinés à être utilisés pour le programme de comparaisons bilatérales proposé par la section d'électricité (comparaison BIPM.EM-K13.b). Les résistances ont été placées dans une enceinte thermostatée et régulée en pression, et les résistances ont été mesurées en fonction de la pression avec un pont fondé sur un comparateur de courant fonctionnant à la fréquence de 1 Hz. Les coefficients de pression relative mesurés sont faibles : de l'ordre de $-0,3 \times 10^{-9}$ /hPa, avec une incertitude-type relative de $0,02 \times 10^{-9}$ /hPa.

Le pont à comparateur de courant cryogénique utilisé pour nos mesures à 1 Ω a été amélioré par l'introduction d'une liaison par fibre optique entre l'ordinateur contrôlant le fonctionnement du pont et l'alimentation en courant du pont. Cela réduit de manière significative le niveau d'interférence des radiofréquences qui perturbent le magnétomètre à SQUID utilisé dans le pont, et rend son fonctionnement plus fiable. La liaison comprend un émetteur de lumière alimenté sur secteur et un récepteur alimenté avec des piles. La liaison est utilisée pour transmettre les signaux de commande depuis l'ordinateur vers les relais du boîtier d'alimentation du pont. En plus de la liaison proprement dite, nous avons aussi conçu et construit un contrôleur de relais par bus IEEE-488. Les circuits intégrés de ce dispositif ont été programmés avec l'aide de la section des rayonnements ionisants.

5.2.2 Mesures d'étalons de résistance à effet Hall quantique à des fréquences de l'ordre du kilohertz (F. Delahaye)

L'amélioration importante de la qualité des mesures de résistance de Hall quantifiée à des fréquences de l'ordre du kilohertz effectuées au BIPM l'an passé [1] a été confirmée par d'autres mesures effectuées dans le cadre de notre programme destiné à rendre notre technique accessible aux autres laboratoires. Nous avons conçu et fabriqué à cet effet des têtes spéciales constituées d'un circuit imprimé et d'électrodes de grille, sur lesquelles il est

possible de fixer un dispositif à effet Hall quantique. Le circuit est équipé de huit broches et s'adapte à l'embase coaxiale de l'EUROMET et du METAS. Cette embase spéciale a été conçue et construite par le METAS, dans le cadre du projet n° 540 de l'EUROMET, afin de faciliter l'échange de dispositifs à effet Hall quantique entre les laboratoires. Nous avons préparé deux têtes, chacune équipée d'un dispositif LEP 514 à effet Hall quantique (une hétérostructure GaAs). Avec ces deux dispositifs nous avons répété les mesures décrites en [1] et confirmé qu'en ajustant comme il convient les tensions des grilles, on obtient un coefficient de variation résiduel en fonction de la fréquence de la résistance de Hall quantifiée de l'ordre de 1 à 2×10^{-8} par kilohertz en valeur relative. On ajuste les tensions des grilles de manière à réduire au minimum le coefficient de tension de la résistance de Hall quantifiée. Cette méthode ne nécessite pas l'usage d'une résistance extérieure dont la dépendance en fonction de la fréquence serait connue. Le résultat est que cette technique fournit un étalon intrinsèque d'impédance de haute qualité métrologique. Les instructions pratiques pour mettre en oeuvre cette méthode sont données dans un rapport BIPM [5].

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

La résistance coaxiale alternative-continue, de coefficient de fréquence calculable, reliant les mesures de résistance à 1 Hz et les mesures de résistance à des fréquences de l'ordre du kilohertz est un élément important de 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). Cette résistance coaxiale, de valeur nominale $1290,64 \Omega$ ou égale à un dixième de la résistance de Hall quantifiée $R_H(2)$, est aussi un étalon de référence pour nos mesures de la résistance de Hall quantifiée en courant alternatif. Cette résistance coaxiale, construite il y a trois ans, présentait une dérive initiale assez importante, aussi sa valeur actuelle est-elle trop éloignée de sa valeur nominale. C'est pourquoi nous avons construit une seconde résistance coaxiale cette année. L'élément résistif mesure 30 cm de long, 20 μm de diamètre et est fait d'un fil en Evanohm S recuit. La particularité de cette sorte d'Evanohm (un alliage pour les résistances à base de nickel et de chrome) est d'avoir un très faible coefficient de température de la résistivité quand il a été recuit à la température appropriée. Pour le fil utilisé (obtenu chez Reid, H.P. Co., États-Unis), ce coefficient est aussi faible que $2 \times 10^{-7}/\text{K}$ en valeur relative, à la température ambiante. La résistance est ajustée au moyen d'une méthode mécanique simple : le fil est attaché à

chaque extrémité à une tige en Evanohm de 2 mm de diamètre ; un méplat à l'extrémité de la tige supporte un écrou miniature et une rondelle pour maintenir le fil en place. On fait varier la longueur du fil entre les deux points d'attache jusqu'à ce que la valeur de la résistance soit suffisamment proche de la valeur nominale. Avec un peu de patience, il est possible d'obtenir une différence relative par rapport à la valeur nominale de la résistance d'environ 70×10^{-6} , ce qui est très acceptable. En évitant les soudures, on évite aussi les effets néfastes dus au réchauffement du fil. On obtient une résistance stable à faible coefficient de température sans traitement thermique complémentaire. Le coefficient de température de la résistance assemblée est de $2 \times 10^{-7}/\text{K}$ en valeur relative. La dérive initiale, mesurée pendant les deux premiers mois suivant la fabrication, est inférieure à 1×10^{-6} par mois en valeur relative.

On peut évaluer le comportement en fonction de la fréquence des étalons de résistance alternative-continue lors de comparaisons entre laboratoires. Le BIPM a participé à une comparaison de mesures du coefficient de fréquence d'étalons de résistance à $12\,906\ \Omega$ et à $6\,453\ \Omega$, dans le cadre du projet n° 432 de l'EUROMET (comparaison supplémentaire EUROMET.EM.S8), dont le rapport final est maintenant disponible.

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

Les étalons électroniques de tension fondés sur des diodes de Zener sont couramment utilisés pour conserver, disséminer et comparer des étalons de tension. Lorsque l'on cherche à obtenir les incertitudes les plus faibles pour ces applications, il faut déterminer la dépendance en fonction de la pression et de la température pour pouvoir appliquer les corrections nécessaires. Nous avons modifié cette année notre nouvel équipement de mesure des coefficients de pression et de température. Nous poursuivons aussi nos études sur le palier du bruit en $1/f$ qui constitue la limite ultime à l'incertitude des mesures d'étalons à diodes de Zener, ainsi qu'à la stabilité et au niveau du bruit des nanovoltmètres utilisés pour les mesures des diodes de Zener et des étalons à effet Josephson.

5.3.1 Améliorations apportées à l'équipement pour la détermination des coefficients de température et de pression des étalons de tension à diode de Zener (R. Chayramy)

La nouvelle enceinte utilisée pour la détermination des coefficients de température et de pression des étalons à diode de Zener (*voir* Rapport du directeur 2000, Section 5.3.1) a été équipée de commutateurs rotatifs dont les contacts génèrent une force thermo-électromotrice très faible. Bien que nous ayons obtenu des résultats satisfaisants, il s'avère difficile d'obtenir le haut niveau de fiabilité souhaité lorsqu'on laisse l'appareil en fonctionnement sans surveillance pendant plusieurs jours. Les commutateurs rotatifs ont été remplacés par des relais magnétiques à basculement montés sur une plaque épaisse en duralumin placée dans un châssis pour augmenter l'inertie thermique afin de réduire les variations de température. Grâce à ce commutateur, les forces thermo-électromotrices mesurées varient de 1 nV à 2 nV. Ces niveaux sont tout à fait acceptables pour des mesures d'étalons à diodes de Zener à 1,018 V et à 10 V. Comme prévu, les connexions avec ces relais sont beaucoup plus fiables.

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

Les études mentionnées dans le rapport du directeur 2000 montrent que l'incertitude des mesures de tension de tous les étalons à diode de Zener étudiés est limitée par le bruit en $1/f$ déterminé à l'aide de la variance d'Allan (constante pour le bruit en $1/f$). Pour les étalons 732B, l'incertitude varie de 30 nV à 100 nV pour les mesures à 10 V et d'environ 5 nV à 15 nV pour les mesures à 1,018 V. Pour étudier la validité statistique de ces résultats et évaluer la reproductibilité de la variance d'Allan, nous avons déterminé la distribution expérimentale d'un échantillonnage de variance d'Allan. Comme nous sommes intéressés par le bruit intrinsèque des étalons à diode de Zener (on peut toujours faire pire) les mesures sont effectuées dans une enceinte pressurisée et thermo-régulée placée dans une cage de Faraday. Une série de mesures typique consiste en 8192 mesures de tension espacées régulièrement dans le temps. On effectue de quelques centaines à un peu plus d'un millier de mesures. Nous calculons à chaque fois la variance d'Allan pour un temps d'échantillonnage $T = 2^k \times T_0$, où k est un nombre entier positif et T_0 le temps écoulé (typiquement de l'ordre de 0,2 s) entre deux mesures successives. Les distributions de l'échantillonnage des variances d'Allan pour ces mesures électriques à basse fréquence sont des distributions de khi-carré, de même

type que les distributions obtenues à partir de valeurs simulées discutées il y a plusieurs années par la communauté du temps et des fréquences. Nos résultats sont utiles pour évaluer la validité statistique des petites différences reproductibles entre les valeurs du palier de bruit en $1/f$ des étalons à diodes de Zener.

Une autre application intéressante de ce travail est la mise en œuvre de deux techniques d'analyse spectrale assez nouvelles, la transformée de Fourier à court terme et les ondelettes en continu utilisées pour étudier les composantes d'un signal dont la fréquence, l'amplitude et la durée fluctuent dans le temps. Par exemple, des composantes fluctuantes de ce type, à des fréquences voisines de 2 Hz et de ses harmoniques, se retrouvent dans les mesures d'étalons à diode de Zener de 10 V, même quand ces derniers sont déconnectés du secteur et sont alimentés par batteries.

5.4 Comparaisons clés continues du BIPM d'étalons électriques (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 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 à la suite d'étalonnages et de comparaisons antérieurs. Les participants ont le choix d'utiliser leurs propres étalons voyageurs à diode de Zener et de résistance, de 1 Ω ou de 10 k Ω , ou ceux du BIPM.

Depuis octobre 2000, nous avons achevé quatre nouvelles comparaisons bilatérales d'étalons à diodes de Zener avec le BEV, le GUM, le NML (Irlande) et le SMU.

5.5 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, la Bulgarie, la Hongrie (4 étalons) et la République tchèque ; résistances de 1 Ω pour la Belgique, la Grèce et la Hongrie ; résistances de 100 Ω pour la Belgique et la Grèce ; résistances de 10 k Ω pour la Belgique, le Danemark, la Grèce, la

Hongrie et la République tchèque ; résistance de 12,9 k Ω (Note d'étude) pour la République tchèque ; et étalons de capacité de 10 pF pour la Pologne et la République tchèque.

5.6 Publications, conférences et voyages : section d'électricité

5.6.1 Publications extérieures

1. Delahaye F., Kibble B. P., Zarka A., Controlling ac losses in quantum Hall effect devices, *Metrologia*, 2000, **37**, 659-670.
2. Reymann D., Witt T.J., Vrabček P., Tang Y.H., Hamilton C.A., Katkov A.S., Jeanneret B., Power O., Recent developments in BIPM voltage standard comparisons, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2001, **50**, 206-209.
3. Satrapinski A., Seppä H., Schumacher B., Warnecke P., Delahaye F., Poirier W., Piquemal F., Comparison of four QHR systems within one month using a temperature and pressure stabilized 100- Ω resistor, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2001, **50**, 238-241.
4. Witt T.J., Using the Allan variance and power spectral density to characterize dc nanovoltmeters, *IEEE Trans. Instrum.*, 2001, **50**, 445-448.

5.6.2 Rapports BIPM

5. Delahaye F., Instructions for ac measurements of gated QHE devices, *Rapport BIPM-2001/01*, 2001, 11 p.
6. Power O., Reymann D., Witt T.J., Bilateral comparison of 10 V standards between the NML, Ireland, and the BIPM, March 2001, *Rapport BIPM-2001/02*, 2001, 4 p.
7. Waldmann W., Reymann D., Witt T.J., Bilateral comparison of 1.018 V and 10 V standards between the BEV, Austria, and the BIPM, April 2001, *Rapport BIPM-2001/03*, 2001, 7 p.

5.6.3 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

T.J. Witt s'est rendu :

- à l'IEA, Turin (Italie), le 6 octobre 2000, pour une réunion du Conseil scientifique ;

- au NPL, Teddington (Royaume-Uni), les 8 et 9 novembre 2000, pour des réunions des personnes chargées de l'électricité au sein de l'EUROMET.

F. Delahaye et D. Reymann ont assisté aux réunions des personnes chargées des domaines de l'effet Hall quantique et des étalons de tension à réseau de Josephson (JAVS) au sein de l'EUROMET (Istanbul, 11 et 12 juin 2001) et ont visité les laboratoires de l'UME. F. Delahaye y a présenté un exposé intitulé « The ac characteristics of gated QHE devices ».

5.7 Activités en liaison avec des organisations extérieures

T.J. Witt est membre du Conseil scientifique de l'IEN et membre du Comité exécutif de la CPEM.

F. Delahaye est secrétaire exécutif du Groupe de travail 2 du Comité commun pour les guides en métrologie (sur la révision du VIM).

5.8 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.

5.9 Visiteurs de la section d'électricité

- M. A. Baranyai (OMH), le 13 novembre 2000.
- M. C. Beuning (Beuning Labs, États-Unis), le 2 avril 2001.
- MM. J. Horsky et J. Streit (CMI), le 25 avril 2001.
- M. A. Tarlowski (GUM), les 26 et 27 avril 2001.
- M. L. Johnson (CSIRO), le 2 mai 2001.
- Mme D. Sochocka (GUM), les 17 et 18 mai 2001.
- Un groupe de 24 étudiants et enseignants de l'École normale supérieure de Cachan, le 14 mai 2001.

6 RADIOMÉTRIE, PHOTOMÉTRIE ET THERMOMÉTRIE (R. KÖHLER)

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

Une comparaison bilatérale avec l'ETL a été réalisée après la comparaison CCPR-S3, la comparaison supplémentaire de radiomètres cryogéniques, et un groupe de récepteurs se trouve actuellement à l'IEN pour une autre comparaison de ce type. Dans le même temps, la comparaison clé CCPR-K2.b a suivi son cours. Cette comparaison se déroule en deux étapes, avec neuf participants à chaque fois. Des récepteurs composés de deux photodiodes à un seul élément et de deux récepteurs à piège à réflexion à trois éléments ont été préparés avant la comparaison. Les récepteurs ont d'abord été montés, mesurés et ensuite étalonnés au BIPM avant d'être envoyés aux participants du premier groupe, qui ont fini leurs mesures à la fin de l'an 2000. Ensuite les récepteurs ont été renvoyés pour étalonnage au BIPM où leur stabilité a été jugée compatible avec les incertitudes globales des mesures effectuées au BIPM, le laboratoire pilote. La seconde étape de la comparaison se déroule actuellement et si, comme prévu, les mesures de retour au BIPM sont terminées à l'automne, le projet A de rapport sera discuté avec les participants durant l'automne 2001.

En radiométrie, nous avons débuté nos travaux sur la réalisation d'une échelle d'éclairement énergétique spectral dans le proche infrarouge avec le corps noir à caloduc au sodium. Après installation du système et mise au point du logiciel de pilotage, les mesures préliminaires donnaient des résultats encourageants, même si la température du caloduc présentait une non-uniformité inexplicée, supérieure à 50 mK. Ce phénomène était toujours à l'étude quand le caloduc s'est mis à fuir alors qu'il fonctionnait à une température de 960 °C. Il en a résulté que la salle où se trouvait l'appareil a été contaminée par des dépôts de sodium et que nous avons dû demander aux pompiers d'intervenir. Lors de cet incident, un thermomètre à résistance de platine à longue tige et quelques composants optiques ont aussi été endommagés. Le système a donc été retourné au fabricant pour réparation et nous avons fait appel à une société spécialisée pour nettoyer le laboratoire. Les premiers essais du système, retourné récemment au BIPM après remplacement du caloduc, indiquent que l'uniformité de la température est meilleure que celle obtenue avec l'ancien caloduc.

Le BIPM a participé à la comparaison supplémentaire d'aires d'ouverture du CCPR (CCPR-S2). Dans la méthode employée, un champ d'éclairement uniforme est produit par superposition virtuelle de nombreux faisceaux laser. Lors de la mise en place de l'expérience, nous avons observé un effet intéressant attribué au profil du faisceau laser ; effet que nous avons ensuite modélisé.

Le logiciel de contrôle du spectro-radiomètre a été mis à niveau et amélioré à l'aide d'outils de programmation graphique. Ce dispositif est utilisé pour la comparaison de sensibilité spectrale et l'étalonnage de radiomètres à filtre ainsi que pour la réalisation primaire de la candela.

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), dont la PTB était le laboratoire pilote, une comparaison bilatérale a été effectuée entre le BIPM et la PTB pour transférer de manière robuste les valeurs de référence des comparaisons clés au BIPM. Ces valeurs ont été présentées au CCPR à sa session d'avril 2001, pendant laquelle un projet de recommandation a été préparé à l'attention du CIPM demandant que le BIPM dissémine dorénavant les valeurs de référence des comparaisons clés de flux lumineux et d'intensité lumineuse en tant qu'échelles du BIPM. Si cette proposition est approuvée par le CIPM, les valeurs du BIPM pour la candela et pour le lumen devront être ajustées de $-0,3\%$ et de $-0,36\%$ respectivement. Les réalisations primaires de la candela et du lumen mises en place au BIPM seront utilisées à l'avenir pour contrôler la stabilité des groupes de lampes qui conservent les valeurs de référence des comparaisons clés.

Les installations du laboratoire de photométrie ont été entièrement renouvelées pendant l'année passée. L'ancien banc photométrique a été remplacé par un nouveau système qui permet de positionner facilement les lampes et les photomètres et de lire leur distance exacte. Le banc est aussi conçu de manière à ce que l'on puisse aisément monter tout équipement qui s'avérerait nécessaire à l'extérieur de la sphère intégrante utilisée pour la nouvelle réalisation primaire du lumen. De nouvelles alimentations pilotées par ordinateur ont été achetées pour les lampes photométriques ; celles-ci permettent d'établir et de couper le courant de manière progressive, ou de le maintenir avec une grande stabilité. Le logiciel de pilotage des mesures en photométrie est en cours de ré-écriture pour améliorer la fiabilité des procédures de fonctionnement. Après l'achèvement des nouvelles

installations, des essais seront réalisés pour s'assurer que le nouveau système fonctionne correctement. À cette occasion, il est prévu de répéter les expériences de réalisations primaires de la candela et du lumen. Des mesures récentes de l'uniformité du facteur de réflexion de la sphère intégrante montrent que ces propriétés n'ont pas été affectées par les travaux de rénovation du laboratoire.

6.3 Pression (M. Stock et R. Pello)

La responsabilité du fonctionnement du manobarmètre et des mesures de pression a été transférée à la section des masses en novembre 2000, compte tenu de ses besoins constants dans ce domaine.

6.4 Thermométrie (S. Solve et R. Pello)

Trente-trois thermomètres à résistance de platine (onze thermomètres à longue tige et vingt-deux de type capsule) ont été étalonnés pour cinq sections du BIPM. Nous avons ensuite étudié la cohérence des températures réalisées au moyen des quatre cellules à point triple de l'eau choisies pour cet étalonnage. En même temps, nous avons aussi étudié la cohérence des températures et des durées de plateau de fusion obtenues au moyen de nos deux cellules à point de fusion du gallium. De plus, nous avons étalonné au point triple de l'eau le nouveau thermomètre à résistance de platine à longue tige qui nous a été donné en remplacement de l'ancien détruit pendant l'incident intervenu sur le corps noir à caloduc.

6.5 Étalonnages (R. Pello, R. Goebel et M. Stock)

Nous n'avons pas effectué d'étalonnages de routine des étalons photométriques en raison de la rénovation complète de nos installations de photométrie.

6.6 Informatique (L. Le Mée et G. Petitgand)

Le site Web du BIPM est de plus en plus consulté de l'extérieur. Il est maintenant possible d'accéder à l'UTC par l'intermédiaire du site du BIPM. La base de données du BIPM sur les comparaisons clés est entièrement opérationnelle et les bases de données contenant les annexes B et C ont été

prises au point et sont accessibles aux utilisateurs en ligne. Une page d'aide a aussi été mise en place pour le suivi des aptitudes en matière de mesure et d'étalonnages et l'examen par les organisations régionales de métrologie. Les délégués des Comités consultatifs et les membres des groupes de travail ont maintenant accès aux documents les concernant, sous forme électronique, par l'intermédiaire du site Web du BIPM ; il est toutefois nécessaire d'utiliser un mot de passe. Le dernier progrès concerne la mise en place d'un moteur de recherche dédié aux travaux des laboratoires nationaux de métrologie et à la métrologie.

La sécurité et la protection de notre réseau ont été améliorées et le système de courrier électronique détecte maintenant les virus informatiques. La vitesse de transmission de notre ligne d'accès à l'Internet est maintenant de 512 kB par seconde. Une étude est en cours pour savoir comment sauvegarder au mieux les données du serveur pour différents services.

De plus, le service informatique apporte son assistance à l'achat, l'installation, l'administration et la maintenance d'environ cent-cinquante ordinateurs personnels ou ordinateurs portables pour les bureaux et les laboratoires. En réponse à la demande des utilisateurs, le service informatique a organisé avec succès une série de cours sur des logiciels.

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

6.7.1 Publications extérieures

1. Köhler R., Key comparisons in photometry and radiometry and the BIPM key comparison database, In *Proceedings of the CIE Expert Symposium 2001 on Uncertainty Evaluation Methods for Analysis of Uncertainties in Optical Radiation Measurement*, CIE, Vienne, 2001, 41-45.

6.7.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

R. Köhler s'est rendu à :

- Borås (Suède), du 6 au 9 septembre 2000, pour un exposé au 4^e atelier Thematic Network for Ultraviolet Measurements, intitulé « International comparisons and equivalence » ;

- Vienne (Autriche), pour le symposium de la CIE sur les incertitudes en photométrie, les 22 et 23 janvier 2001, pour un exposé intitulé « Key comparisons in photometry and radiometry and the BIPM key comparison database », et pour la réunion des personnes chargées des relations dans le domaine de la photométrie et de la radiométrie au sein de l'EUROMET, du 24 au 26 janvier 2001 ;
- Budapest (Hongrie), pour la réunion des personnes chargées des relations dans le domaine de la thermométrie au sein de l'EUROMET, du 26 au 28 mars 2001.

M. Stock s'est rendu à :

- Varenna (Italie), à l'International School of Physics « Enrico Fermi », Course CXLVI, Recent Advances in Metrology and Fundamental Constants, du 25 juillet au 4 août 2000 ;
- Stuttgart (Allemagne), les 21 et 22 septembre 2000, à la société Gero GmbH pour vérifier le fourneau du caloduc endommagé, et pour visiter l'Institute for Nuclear Technology and Energy Conversion (IKE) de l'université de Stuttgart ;
- Berlin (Allemagne), pour la conférence TempMeko et les réunions des Groupes de travail 3 et 7 du CCT, du 18 au 22 juin 2001.

R. Goebel s'est rendu au NMi VSL, Delft (Pays-Bas), les 15 et 16 janvier 2001 pour visiter le laboratoire et pour des discussions sur les radiomètres cryogéniques.

S. Solve s'est rendu à Berlin (Allemagne), pour la conférence TempMeko, du 19 au 21 juin 2001.

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 des 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

- L. Liedquist (SP), 2 avril 2001, pour apporter des lampes photométriques.

6.11 Stagiaires et étudiants

- M. B. Theron (CSIR-NML), du 30 avril au 11 mai 2001, pour travailler sur le radiomètre cryogénique.
- M. T. Hasebe (étudiant), du 1^{er} mars au 31 décembre 2000.

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

7.1 Rayons x et γ (P.J. Allisy-Roberts et D.T. Burns ; P. Roger)

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

Faisant suite à nos travaux utilisant le programme de calcul de Monte Carlo EGS4, nous avons installé (sous Linux) une nouvelle version du code EGSnrc et modifié les codes utilisateurs. Les calculs des facteurs de correction pour la perte d'électrons et pour la diffusion des photons ont été à nouveau appliqués à trente chambres étalons des laboratoires nationaux de métrologie ; nous avons constaté que les résultats s'accordaient bien avec les calculs antérieurs (avec une différence maximale de 0,1 %). Cependant, le fait d'inclure la fluorescence par rayons x dans le nouveau code met en lumière un effet, dû à la teneur en argon de l'air, pour lequel nous n'avons pas appliqué de correction jusqu'à maintenant. En ce qui concerne l'étalon du BIPM, le facteur de correction à appliquer peut atteindre 0,5 %. Les résultats ont été présentés à la session du CCRI de mai 2001 et il a été décidé que les nouveaux facteurs de correction doivent être appliqués à l'étalon du BIPM avant d'inclure les données dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés.

7.1.2 Étalons et équipements pour la dosimétrie

Après changement du générateur à haute tension, le tube à rayons x aux basses énergies en service depuis quarante ans s'est montré instable et a été remplacé. Le nouveau tube a une fenêtre en béryllium plus mince, aussi avons-nous ajouté un filtre compensateur en béryllium afin de reproduire la couche de demi-atténuation obtenue avec l'ancienne qualité de rayonnement à 10 kV. Nous avons déterminé les qualités des rayonnements de référence du CCRI avec ce nouveau filtre et les filtres habituels en aluminium. L'effet de la masse volumique de l'air ambiant sur la correction pour l'atténuation de l'air a été à nouveau étudié pour la qualité à 10 kV ; si cet effet n'est pas correctement pris en compte, il peut introduire des erreurs pouvant atteindre 0,15 %. Nous en avons profité pour confirmer les effets de la recombinaison des ions et de la polarité sur l'étalon du BIPM.

Les générateurs à haute tension pour les rayons x aux moyennes énergies ont aussi été remplacés, nous attendons la construction d'un diviseur de tension pour les essayer. L'ensemble devrait être remis en service en novembre 2001.

La nouvelle source de ^{60}Co à 250 TBq pour des applications thérapeutiques a été installée pour les mesures de kerma dans l'air et de dose absorbée. Les systèmes de sécurité, de protection, et de positionnement sont en cours d'installation. Nous déterminerons en détail les caractéristiques des faisceaux dans l'air et dans l'eau. L'ancienne source continuera à être utilisée pour les comparaisons et les étalonnages, du moins tant que la mise en place du nouveau faisceau ne sera pas terminée.

Il a fallu déménager l'ancienne source de ^{60}Co à 400 GBq afin d'installer la nouvelle et l'on redétermine actuellement ses caractéristiques avant de l'utiliser en continu pour la mesure des étalons équivalents de dose ambiante. L'étalon de kerma dans l'air pour le ^{137}Cs , endommagé accidentellement pendant les travaux de rénovation du hall d'exposition consécutifs à une tempête, a été remis en service.

7.1.3 Comparaisons de dosimétrie

Nous avons effectué des comparaisons directes avec le BEV (Autriche) et l'OMH (Hongrie) après l'installation des nouveaux équipements pour les rayons x aux basses énergies. Les rapports sur les comparaisons de rayons x aux moyennes énergies avec l'ENEA (Italie) et l'OMH ont été publiés, et les rapports sur les précédentes comparaisons avec le NPL (Royaume-Uni), le NRC (Canada) et le VNIIM (Féd. de Russie) devraient l'être prochainement.

Les rapports des autres comparaisons aux basses énergies avec le BEV, l'OMH, la PTB (Allemagne) et le VNIIM sont en préparation.

L'analyse des comparaisons de rayons x aux basses et moyennes énergies en matière de degré d'équivalence à inclure dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés a été présentée au CCRI. Le CCRI a décidé d'exclure les comparaisons dont les résultats n'ont pas été publiés et d'inclure à titre provisoire certaines comparaisons datant de plus de dix ans dont les résultats ont été publiés.

Des comparaisons de dosimétrie d'étalons de kerma dans l'air du rayonnement gamma ont été effectuées avec le NMIJ/AIST, la PTB et le SMU. Les rapports sur ces comparaisons sont en préparation, et celui d'une précédente comparaison avec le NRC a été publié. Les comparaisons internationales d'étalons de kerma dans l'air du rayonnement gamma sont sources de préoccupation pour le CCRI, et un groupe de travail a été créé pour rendre cohérents les bilans d'incertitude à appliquer à chacune des méthodes utilisées pour les étalons nationaux. Le Groupe de travail de la Section I du CCRI sur les comparaisons clés a approuvé un programme d'actions à entreprendre par les laboratoires nationaux de métrologie concernés, incluant notamment la participation du BIPM aux programmes de calcul de Monte Carlo et la formation à leur utilisation pour les faisceaux de rayonnement gamma aux hautes énergies. Le CCRI veille à ce qu'aucun résultat n'apparaisse dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés tant que ces diverses questions ne seront pas résolues au niveau international. Cette préoccupation a naturellement retardé la publication des résultats d'un certain nombre d'autres comparaisons, par exemple ceux de la comparaison avec le BARC (Inde), l'ENEA et le NPL.

Les résultats des comparaisons de dose absorbée dans l'eau dans le rayonnement du ^{60}Co entre le BIPM, et pour la première fois, le METAS (Suisse) et le VNIIFTRI (Féd. de Russie) sont en cours d'analyse. Un rapport sur une comparaison plus ancienne avec le NMi VSL (Pays-Bas) a déjà été publié, et le rapport sur la comparaison avec le NPL est presque achevé. Tous ces résultats devraient être prêts à être inclus dans le second projet B de rapport de la comparaison clé dans ce domaine ; le premier projet B de rapport qui concernait huit laboratoires nationaux de métrologie avait été préparé pour la réunion du CCRI.

La comparaison clé du CCRI de dose absorbée dans l'eau dans le rayonnement du ^{60}Co , dont le BIPM est le laboratoire pilote, s'est poursuivie cette année. Quatre laboratoires nationaux de métrologie avaient participé à la comparaison lors de la première année, et des mesures ont été réalisées en

2000 avec l'ENEA, le NIST (États-Unis), le NMi VSL, le NRC et la PTB, le BIPM vérifiant les trois étalons de transfert entre les mesures dans chaque laboratoire national de métrologie. Des mesures supplémentaires ont aussi été nécessaires pour identifier la réponse en fonction de l'orientation d'un des étalons de transfert. Cette première comparaison clé de la Section I du CCRI est presque terminée, et le projet A du rapport est en cours.

Les quatre chambres étalons de transfert pour la comparaison supplémentaire de dose absorbée aux hautes énergies continuent à être mesurées périodiquement dans le faisceau de ^{60}Co du BIPM et leur comportement semble cohérent. Le NPL a participé cette année à la comparaison ; l'ARPANSA (Australie) et le BNM-LNHB (France) ont fait part de leur intérêt.

7.1.4 Étalonnages pour la dosimétrie

Les changements majeurs apportés aux équipements pour la dosimétrie et la rénovation des laboratoires n'ont permis d'effectuer cette année que dix étalonnages d'étalons secondaires pour l'AIEA et le LNMRI (Brésil). Le programme de dosimétrie de l'AIEA se poursuit dans le domaine des irradiations de référence.

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}Tl

Le groupe de travail sur la comparaison internationale de ^{204}Tl a présenté son rapport lors de la session du CCRI. La plupart des problèmes expérimentaux rencontrés au cours de cette comparaison clé qui a été abandonnée ont été étudiés et un nouveau protocole de comparaison a été mis au point pour les éviter à l'avenir. Une nouvelle comparaison clé est prévue.

7.2.2 Comparaison de mesures d'activité d'une solution de ^{152}Eu

Vingt-trois laboratoires ont participé à la comparaison clé de mesures d'activité d'une solution de ^{152}Eu . Onze méthodes différentes ont été employées pour les mesures, la plupart fondées sur des compteurs proportionnels ou des spectromètres gamma 4π NaI(Tl). Des techniques de scintillation liquide, ainsi que des méthodes relatives, utilisant des chambres d'ionisation étalonnées ou des détecteurs au germanium, ont été aussi

adoptées. À l'exception de quatre résultats, tous se situent dans une fourchette de $\pm 1,4\%$. Les résultats obtenus par la méthode de comptage $4\pi\beta\text{-}\gamma$ avec un détecteur NaI(Tl) de type puits montrent une dispersion inattendue qui peut nécessiter l'examen des corrections appliquées.

Chaque ampoule a été mesurée dans le SIR avant d'être expédiée afin d'évaluer une activité équivalente pour chaque participant. Ces valeurs s'accordent avec les valeurs du SIR déjà existantes. Un rapport sur la comparaison est en cours de rédaction.

7.2.3 Comparaison de mesures d'activité d'une solution de ^{89}Sr

La comparaison clé de mesures d'activité d'une solution de ^{89}Sr , qui a débuté au printemps 2000, est terminée. La solution, obtenue par dilution de 30 mg de SrCl_2 dans un litre d'acide chlorhydrique à 0,1 mole, a été préparée par la PTB et distribuée par le BIPM à vingt-trois laboratoires. La PTB y a identifié des impuretés de ^{85}Sr et de ^{90}Sr ainsi que des traces de ^{84}Rb et de ^{86}Rb . Les mesures effectuées dans les autres laboratoires nationaux de métrologie confirment les valeurs de la PTB pour les impuretés gamma.

La solution a été mesurée dans dix-neuf laboratoires ; le dernier résultat a été envoyé au BIPM en février 2001. Dix méthodes différentes ont été utilisées qui ont donné trente et un résultats indépendants. Des techniques de scintillation liquide ont été utilisées par dix-sept laboratoires et la méthode $4\pi\beta\text{-}\gamma$ de mesure de l'efficacité au moyen de différents traceurs (^{24}Na , ^{60}Co ou ^{134}Cs) a été utilisée par huit laboratoires nationaux de métrologie. Si l'on exclut la méthode utilisant le ^{60}Co comme traceur, tous les résultats s'accordent à environ 1 % près. Trois des cinq résultats obtenus avec le ^{60}Co se situent entre 2σ et 3σ de la valeur moyenne. Ce résultat indique que l'emploi du ^{60}Co comme traceur n'est pas approprié dans le cas présent ; cependant le CCRI estime que ce traceur pourrait être utilisé si l'on augmente les incertitudes.

7.2.4 Comparaison de mesures d'activité d'une solution de ^{238}Pu

Le BIPM a organisé la comparaison clé de mesures d'activité d'une solution de ^{238}Pu et le NPL a fourni la solution obtenue par dilution de PuCl_4 dans une solution aqueuse d'acide chlorhydrique à 1 mole. Des traces de ^{239}Pu , de ^{240}Pu , de ^{241}Pu et de ^{242}Pu ont été décelées dans la solution, mais avec une activité plus faible d'au moins 1×10^{-4} que celle du ^{238}Pu . Vingt-cinq ampoules scellées à la flamme de type NBS, remplies d'environ 3 g de

solution, ont été préparées et envoyées aux participants par le NPL. La procédure d'envoi n'a pas posé de problème pour onze pays, mais trois laboratoires nationaux de métrologie ont rencontré des difficultés majeures pour importer la solution radioactive de ^{238}Pu à temps, compte tenu du programme fixé pour la durée de la comparaison. Par conséquent, la Section II du CCRI a repoussé de quatre mois la date limite et à ce jour seulement six laboratoires ont envoyé leurs résultats au BIPM.

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

En 2000, huit laboratoires (le BNM-LNHB, l'IRA/METAS, le LNMRI, le NIST, le NMIJ/AIST, le NPL, l'OMH et la PTB) ont envoyé au BIPM seize ampoules à mesurer dans le SIR. Les ampoules contenaient treize radionucléides : ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co (deux résultats), ^{88}Y , ^{89}Sr , ^{109}Cd , $^{110}\text{Ag}^m$, ^{137}Cs , ^{139}Ce , ^{152}Eu et ^{177}Lu (deux résultats). Le nombre total d'ampoules mesurées depuis le début du SIR est de 795, correspondant à un total de 567 résultats indépendants. Depuis les débuts du SIR, trente-neuf résultats ont été retirés, ce qui représente 6,9 % des résultats enregistrés. Le nombre de radionucléides différents mesurés dans le SIR est maintenant de cinquante-huit.

Le radionucléide ^{177}Lu ($T_{1/2} = 6,646$ d ; $u = 0.005$ d) vient d'être mesuré pour la première fois dans le SIR. La solution contient une impureté de $^{177}\text{Lu}^m$ dont la demi-vie est beaucoup plus longue que celle du ^{177}Lu et pour laquelle les mesures du SIR sont trente fois plus sensibles. La correction pour tenir compte de cette impureté est des plus importantes quand la mesure dans le SIR intervient longtemps après celle du laboratoire national de métrologie. La mesure de l'activité de l'impureté faite au BIPM a été utilisée par un laboratoire national de métrologie car elle donnait des résultats plus cohérents.

Au cours de l'année, les équipements pour le SIR ont été déménagés dans un nouveau laboratoire permettant un contrôle de la température et de l'humidité. La ré-installation s'est bien déroulée, la stabilité a été maintenue et les équipements ont été remis en service dans les trois semaines qui ont suivi le déménagement.

En avril 2001, six ampoules préparées par la PTB à partir de la solution non diluée de ^{89}Sr utilisée pour la comparaison clé ont été reçues au BIPM pour mesure dans le SIR. La réponse au rayonnement de freinage (bremsstrahlung) provenant de l'émission β de ce radionucléide suffit pour

déterminer l'activité équivalente du ^{89}Sr . Bien que le ^{85}Sr présent comme impureté dans la solution contribue jusqu'à une fraction de 30 % du courant d'ionisation mesuré, la réponse de la chambre à cette impureté est connue, ce qui permet d'apporter la correction nécessaire.

7.2.6 Courbe d'efficacité du SIR

La sélection des valeurs de l'activité équivalente expérimentale à prendre en compte pour déterminer la courbe d'efficacité gamma d'un radionucléide donné est fondée principalement sur les critères suivants : un résultat par laboratoire, ou au minimum un intervalle de dix ans entre deux résultats du même laboratoire ; et, pour les émetteurs de rayonnement gamma aux basses énergies, une solution radioactive à concentration faible en acide ou en entraîneur. La fonction utilisée pour ajuster la réponse est maintenant un polynôme du sixième ordre jusqu'à 1 MeV puis une fonction décroissante exponentiellement pour les hautes énergies. La courbe d'efficacité gamma qui en résulte présente une incertitude-type relative inférieure à 10^{-2} aux énergies supérieures à 65 keV ; elle est souvent utilisée pour évaluer la réponse du SIR aux impuretés.

Un point supplémentaire utile à l'évaluation de la courbe d'efficacité bêta du SIR provient d'une mesure de la solution de ^{89}Sr non diluée de la comparaison clé. La courbe exponentielle ajustée conduit à une incertitude relative d'environ 5×10^{-2} , une valeur acceptable car la réponse bêta est un effet du second ordre.

7.2.7 Mise en œuvre de la méthode du rapport des coïncidences triples aux coïncidences doubles (TDCR)

Après le déménagement d'une partie du laboratoire, le dispositif utilisé pour la méthode du rapport des coïncidences triples aux coïncidences doubles a été ré-installé. Trois préamplificateurs identiques et robustes ont été conçus pour remplacer les préamplificateurs rapides Ortec qui s'étaient révélés sensibles aux tensions de pics anormalement élevés des impulsions. Une modification similaire a été apportée aux canaux spectroscopiques pour traiter des signaux de 100 ns. Un logiciel d'acquisition des données des onze signaux concernés et de traitement des données (en FORTRAN) a aussi été mis au point*. Une série de mesures de différents radionucléides a été faite ; les premiers résultats sont acceptables pour le ^{14}C et le ^{99}Tc , les résultats sont

* par J. Hostache de la section des masses.

prometteurs pour le ^{89}Sr , mais ils sont inacceptables pour le ^3H . Ces divergences sont à l'étude.

7.2.8 Spectrométrie de rayonnement gamma

En plus du contrôle de la stabilité du spectromètre Ge(Li) au moyen de mesures périodiques d'ampoules de ^{60}Co et de ^{137}Cs , nous avons effectué des vérifications de l'activité et des impuretés des ampoules de ^{57}Co , ^{58}Co , ^{89}Sr , $^{110}\text{Ag}^m$, ^{139}Ce et ^{177}Lu du SIR. Les résultats sont en accord à deux incertitudes-types près avec les valeurs des laboratoires participants.

La résolution énergétique du spectromètre HPGe a été mesurée et montre une dépendance quadratique. La résolution est similaire à celle du spectromètre Ge(Li) aux basses énergies, mais elle est meilleure aux hautes énergies. De plus, la forme du pic est presque gaussienne sur tout le domaine d'énergie, ce qui facilitera bien l'analyse spectrale une fois que l'on aura terminé l'étalonnage du spectromètre HPGe.

7.2.9 Systèmes primaires de mesure

Les échelles de comptage des coïncidences bêta et gamma ont été remplacées par des cartes d'ordinateurs, pilotées sous LabView. L'acquisition des données est plus transparente et une estimation de l'activité mesurée est maintenant disponible en temps réel. Un système numérique de comptage des coïncidences, mis au point par le NPL et l'ANSTO, nous a été prêté et les premiers résultats semblent prometteurs.

Toutes les mesures temporelles réalisées dans la section des rayonnements ionisants sont fondées sur des oscillateurs à quartz. Leur fréquence a été vérifiée par comparaison directe à une horloge à césium en fonctionnement à la section du temps, en collaboration avec P. Moussay. La différence relative maximale observée par rapport à la fréquence nominale est de $1,5 \times 10^{-5}$, ce qui ne devrait pas limiter la précision des mesures d'activité.

7.3 Publications, conférences et voyages : section des rayonnements ionisants

7.3.1 Publications extérieures

1. Andreo P., Burns D.T., Hohlfeld K., Huq M.S., Kanai T., Laitano F., Smyth V., Vynckier S., Absorbed dose determination in external beam radiotherapy; an international Code of Practice for dosimetry based on

standards of absorbed dose to water, *IAEA Technical Reports Series* No. 398, AIEA, Vienne, 2001, 229 p.

2. Pieksma M., van Dijk E., Burns D.T., Allisy-Roberts P.J., Comparison of the standards for absorbed dose to water of the NMi VSL and the BIPM for ^{60}Co gamma rays, *NMi VSL-Report S-TS-2001.01*, 2001, 14 p.
3. Ratel G., Mutual recognition and equivalence in radioactivity: how can the international reference system be used?, In *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology V* (P. Carliani, M.G. Cox, E. Filipe, F. Pavese et D. Richter eds), World Scientific, Singapour, 2001, 291-297.

7.3.2 Rapports BIPM

4. Boutillon M., Allisy-Roberts P.J., Burns D.T., Measuring conditions for the calibration of ionization chambers at the BIPM, *Rapport BIPM-01/04*, 2001, 19 p.
5. Burns D.T., Toni M.P., Bovi M., Comparison of the air-kerma standards of the ENEA-INMRI and the BIPM in the medium-energy x-ray range, *Rapport BIPM-2000/04*, 2000, 13 p.
6. Burns D.T., Csete I., Comparison of the air-kerma standards of the OMH and the BIPM in the medium-energy x-ray range, *Rapport BIPM-2000/05*, 2000, 13 p.

7.3.3 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

P.J. Allisy-Roberts s'est rendue à :

- Bethesda (États-Unis), du 8 au 12 juillet 2000, pour participer à la réunion de l'ICRU Report Committee on Measurement Quality Assurance in Radiation Dosimetry ;
- Casaccia (Italie), du 21 au 25 juillet 2000, et à Ottawa (Canada), du 7 au 9 octobre 2000, pour transporter les instruments de transfert de la comparaison clé de la Section I du CCRI et visiter les laboratoires de l'ENEA et du NRC, respectivement ;
- York (Royaume-Uni), le 5 septembre 2000, pour présider un groupe de travail sur l'application des directives européennes sur l'utilisation des rayonnements ionisants dans le domaine médical ;

- Londres (Royaume-Uni), le 8 septembre 2000, le 28 février 2001 et le 18 juin 2001, pour l'United Kingdom Health and Safety Commission Ionizing Radiation Advisory Committee (IRAC) et pour un groupe de travail ; le 11 janvier et le 10 avril 2001, pour le comité de rédaction du *Journal of Radiological Protection* ; le 25 avril et le 10 mai 2001 pour présider l'examen du programme trisannuel proposé par le NPL dans le domaine des rayonnements ionisants et de l'acoustique, respectivement ;
- Southampton (Royaume-Uni), le 14 septembre 2000, pour assister à une réunion de la National Conference on Medical Physics, et invitée à présenter un exposé sur le bon usage des rayonnements ionisants dans le domaine médical ;
- Gaithersburg (États-Unis), du 24 octobre au 1^{er} novembre 2000, pour transporter les instruments de transfert, participer à la comparaison clé de la Section I du CCRI au NIST, et assister à la réunion annuelle du CIRMS ;
- Teddington (Royaume-Uni), les 8 et 9 novembre 2000, pour présider la réunion sur l'examen du programme du NPL pour les domaines de l'acoustique et des rayonnements ionisants, dans le cadre de l'United Kingdom Department of Trade and Industry – Measurement Advisory Committee (MAC) ;
- Vienne (Autriche), du 13 au 17 novembre 2000, pour représenter le BIPM au SSDL Scientific Committee de l'AIEA.

D.T. Burns s'est rendu :

- au Cap (Afrique du Sud), du 30 octobre au 3 novembre 2000, comme représentant du BIPM à une réunion de la Main commission de l'ICRU ;
- à Bratislava (Slovaquie), au SMU, du 28 février au 2 mars 2001, comme représentant du BIPM pour une réunion des personnes chargées des relations dans le domaine des rayonnements ionisants au sein de l'EUROMET.

C. Michotte s'est rendue à Casaccia (Italie), le 11 août 2000, pour transporter les instruments de transfert pour la comparaison clé de la Section I du CCRI et visiter les laboratoires de l'ENEA.

C. Michotte et G. Ratel se sont rendus à Braunschweig (Allemagne), du 14 au 18 mai 2001, pour la 13^e International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications. C. Michotte y a présenté un exposé sur « Efficiency curve of the ionization chamber of the SIR » ; G. Ratel y a fait

deux exposés sur les comparaisons clés de la Section II du CCRI sur le ^{152}Eu et le ^{89}Sr .

G. Ratel s'est rendu à Karlsruhe (Allemagne), du 7 au 11 mai 2001, pour présenter un exposé intitulé « The extension of the SIR: Why and how? » à l'International Conference on Advances in Liquid Scintillation Spectrometry LSC2001 qui s'est tenue au Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt (FTU/FZK).

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) dans le domaine de l'acoustique et des rayonnements ionisants et membre scientifique de l'U.K. Health and Safety Commission's Ionizing Radiations Advisory Committee (IRAC). Elle est membre de l'ICRU Report Committee ; 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 qui a publié cette année un code de pratique international pour la dosimétrie en radiothérapie ; des résumés de ce code de pratique, présentés à quatre réunions (en Afrique du Sud, en Allemagne, aux États-Unis et en Grèce), ont été publiés. 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. Il a aussi été membre du conseil scientifique de la 13^e Conference on Radionuclide Metrology and its Applications (ICRM 2001), pour lequel il a revu six articles.

7.5 Activités liées au travail des Comités consultatifs

P.J. Allisy-Roberts est secrétaire exécutive du CCRI et de ses trois Sections, qui se sont réunies en mai 2001, et du CCAUV. Elle est membre, avec D.T. Burns, des groupes de travail de la Section I du CCRI sur l'équivalence des mesures métrologiques (les comparaisons clés) et sur les facteurs de correction pour le kerma dans l'air pour les chambres à cavité. Elle a aussi participé aux groupes de travail des organisations régionales de métrologie

sur les questions relatives à la classification des aptitudes des laboratoires en matière de mesures et d'étalonnages dans le domaine des rayonnements ionisants, le 11 septembre 2000, et dans le domaine de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations, les 15 et 16 février 2001.

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 l'analyse des comparaisons de ^{192}Ir et de ^{204}Tl .

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

- MM. J. Keightley (NPL) et G. Watt (ANSTO), du 3 au 7 juillet 2000.
- M. M. Sené (NPL), le 5 juillet 2000.
- M. A. Aalbers (NMI VSL), le 19 septembre 2000 et les 12 et 13 juin 2001.
- M. C. Tuniz (Nations unies), le 29 septembre 2000.
- M. R. Collé (NIST), le 2 octobre 2000.
- M. D. Alexiev (ANSTO), le 16 octobre 2000.
- Mme A. Todorova (NCM), le 20 octobre 2000.
- M. L. Grigorescu (IFIN), le 27 octobre 2000.
- M. G. Stucki (METAS), le 7 novembre 2000.
- MM. I. Kharitonov et S. Sepman (VNIIM), le 10 novembre 2000.
- M. McEwen (NPL), le 29 janvier 2001.
- M. J. Keightley (NPL), Mme S. van de Geest et M. G. Watt (ANSTO), les 8 et 9 mars 2001.
- M. M. Cox (NPL), le 29 mars et le 9 mai 2001.
- M. G. Winkler (IRK), le 24 mai 2001.
- M. S. Duane (NPL), du 26 au 28 juin 2001.

7.7 Stagiaires, chercheurs invités et étudiants

- MM. R. Broda (RC) et P. Cassette (BNM-LNHB), du 8 au 15 septembre 2000.

- M. F. Gábriš (SMU), du 26 au 29 septembre 2000.
- M. L. Büermann (PTB), du 27 novembre au 7 décembre 2000.
- MM. Y. Koyama et N. Takata (NMIJ/AIST, précédemment dénommé ETL), du 8 au 19 janvier 2001.
- MM. V.B. Berliand et S.V. Korostin (VNIIFTRI), du 12 au 15 mars 2001.
- M. J. Witzani (BEV), du 19 au 23 mars 2001.
- M. I. Csete (OMH), du 26 au 30 mars 2001.
- Mme C. Kessler du CRRD (Argentine) a travaillé comme chercheur invité dans le domaine de la dosimétrie des rayonnements du 2 mai au 29 juin 2001. Il est proposé de prolonger son détachement du CRRD pour une période supplémentaire de quatre mois.
- M. R. Poledna (LNMRI-IRD), du 21 au 23 mai 2001.
- M. J.G.P. Peixoto (LNMRI-IRD), du 23 mai au 1^{er} juin 2001.
- M. L. Czap (AIEA), du 11 au 15 juin 2001.
- MM. M. McEwen et R. Thomas (NPL), du 18 au 29 juin 2001.

8 CHIMIE (R. WIELGOSZ)

8.1 Formulation du programme

Le programme de travail expérimental de la section de chimie a été formulé après consultation d'un groupe d'experts du Groupe de travail du CCQM sur l'analyse de gaz. La procédure de formulation, qui s'est déroulée entre mai et septembre 2000, comprenait une série de visites de laboratoires et des discussions. Le rapport final a été présenté au CIPM en octobre 2000.

Le programme de travail expérimental de la section comprend un projet sur la photométrie de l'ozone qui sera réalisé en collaboration avec le NIST, ainsi que des projets relatifs à l'installation d'équipements pour la comparaison d'étalons de gaz. Le programme permettra d'effectuer des mesures d'ozone dans l'atmosphère au moyen d'une méthode d'analyse sophistiquée de l'ozone par photométrie. Ce programme aura pour résultat le transfert de responsabilité au BIPM des comparaisons internationales de

photomètres de référence pour les mesures d'ozone. Pour atteindre cet objectif, une série de comparaisons en continu fondée sur l'infrastructure des comparaisons clés du BIPM sera organisée. Le programme de comparaison proposé a été présenté dans le cadre de l'atelier consacré au projet n° 414 (ozone) de l'EUROMET, et il sera discuté ultérieurement afin de formuler une étude pilote du CCQM sur la comparabilité des photomètres étalons d'ozone (CCQM-P28). Les comparaisons seront étayées par un programme de recherche au BIPM visant à étudier la photométrie de l'ozone par titrage du monoxyde d'azote et du dioxyde d'azote en phase gazeuse, et à mesurer les sections efficaces de l'ozone dans certaines bandes de l'ultraviolet. Ce travail sera réalisé en collaboration avec le NIST et la section de radiométrie du BIPM.

La procédure de recrutement du personnel de la section est en cours. Mme Joële Viallon rejoindra l'équipe en juillet 2001, et le recrutement d'un chercheur en chimie pour le programme sur la métrologie des gaz devrait avoir lieu à l'automne 2001.

8.2 Conception et construction du laboratoire

La phase de conception des laboratoires de chimie, situés au sous-sol du bâtiment des rayonnements ionisants, s'est déroulée de mai à août 2000, et la réalisation elle-même a débuté en septembre. L'installation devrait s'effectuer pendant l'été 2001, elle sera suivie de celle des systèmes d'approvisionnement en gaz, ce qui permettra de vérifier les deux photomètres de référence du NIST pour les mesures d'ozone à l'automne 2001. L'installation des autres équipements se poursuivra au cours des mois suivants.

8.3 Activités en liaison avec des organisations extérieures

Le BIPM a participé à une réunion de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), et y a présenté les programmes du CCQM et du BIPM dans le domaine de la métrologie des gaz et les comparaisons connexes, réunion au cours de laquelle le programme de surveillance atmosphérique du Globe (GAW) de l'OMM a été décrit. Ce programme a été établi pour « coordonner le contrôle et les recherches relatifs aux changements atmosphériques ». Il coordonne les activités de vingt-deux observatoires dans le monde et de trois cents stations régionales associées qui contrôlent un certain nombre de gaz d'intérêt pour le CCQM, y compris le gaz carbonique,

le méthane, le peroxyde d'azote, l'ozone et les composés organiques volatiles. Le BIPM et des membres du CCQM ont assisté en avril 2001 à la réunion du groupe de travail de l'OMM sur la surveillance atmosphérique du globe, qui s'était réuni pour discuter de la stratégie à mettre en œuvre pour la période 2001-2007. Une résolution a été adoptée en session plénière, à propos du bénéfice qui pourrait résulter de la participation à venir du BIPM et des laboratoires nationaux de métrologie au Science Advisory Group de l'OMM-GAW aux études sur les gaz réactifs. Une autre réunion devrait avoir lieu au BIPM à la fin de l'année 2001.

8.4 Activités liées au travail des Comités consultatifs

R.I. Wielgosz est secrétaire exécutif du CCQM.

Le BIPM a aidé activement les laboratoires nationaux qui participent au MRA, en établissant une série de directives visant à structurer les rapports finaux des comparaisons clés et les publications connexes dans *Metrologia*. De plus, le BIPM a participé à l'examen des déclarations sur les aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages (CMC) dans le domaine de l'analyse des gaz, afin de mettre au point un moteur de recherche pour la base de données de l'annexe C du MRA dans le domaine de la quantité de matière. Le BIPM accueillera à la fin de l'année 2001 la réunion sur l'examen des CMCs dans le domaine de la quantité de matière au niveau inter-régional et y participera.

8.5 Publications, conférences et voyages : section de chimie

8.5.1 Publications extérieures

1. Wielgosz R.I., The sixth meeting of CCQM, April 2000, *Accreditation and Quality Assurance*, 2001, **6**, 213-214.
2. Wielgosz R.I., CCQM primary methods symposium: how far does the light shine?, *Accreditation and Quality Assurance*, 2001, **6**, B329-B331.

8.5.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

R.I. Wielgosz s'est rendu :

- à Berlin (Allemagne), les 22 et 23 mai 2000, pour le symposium Eurachem/Eurolab sur « Reference Materials for Technologies in the New Millenium » ;

- au BNM-LNE, Paris (France), le 30 mai 2000, pour discuter du programme du BIPM dans le domaine de la métrologie des gaz ;
- au NMi VSL, Delft (Pays-Bas), le 22 juin 2000, pour discuter du programme du BIPM dans le domaine de la métrologie des gaz, et les 22 et 23 janvier 2001, comme représentant du BIPM à la réunion sur l'évaluation des CMCs dans le domaine de l'analyse des gaz ;
- à l'AIEA, Seibersdorf (Autriche), le 5 juillet 2000, pour discuter des activités du CCQM et du programme du BIPM dans le domaine de la métrologie en chimie ;
- au NIST, Gaithersburg (États-Unis), du 7 au 18 août 2000, pour visiter le Chemical Science and Technology Laboratory et pour des discussions sur le programme de chimie du BIPM, et du 1^{er} au 3 novembre 2000, pour participer au Workshop on Measurement Traceability for Clinical Laboratory Testing and In Vitro Diagnostic Test Systems ;
- à l'OMM, Genève (Suisse), le 10 novembre 2000, pour discuter du programme de surveillance atmosphérique du Globe (GAW) de l'OMM et présenter les activités du BIPM et du CCQM dans le domaine de la métrologie des gaz, et le 2 avril 2001, comme représentant du BIPM à la réunion de 2001 du programme OMM-GAW ;
- à Teddington (Royaume-Uni), du 13 au 15 novembre 2000, comme représentant du BIPM au Groupe de travail du CCQM sur l'analyse inorganique et pour assister à la réunion du CCQM Task-force on Biometrology, et au NPL (Royaume-Uni), le 16 novembre 2000, pour discuter du programme du BIPM dans le domaine de la métrologie des gaz ;
- à l'IRMM, Geel (Belgique), les 24 et 25 janvier 2001, pour discuter des activités du CCQM et du programme du BIPM dans le domaine de la métrologie en chimie ;
- à l'EMPA, Zurich (Suisse), le 26 février 2001, pour présenter le programme du BIPM dans le domaine de la métrologie des gaz et discuter du réseau OMM-GAW ;
- au METAS, Bern-Wabern (Suisse), le 27 février 2001, pour discuter du programme du BIPM dans le domaine de la métrologie des gaz ;
- au LGC, Teddington (Royaume-Uni), le 7 juin 2001, pour un séminaire intitulé « An International Programme of Metrology in Chemistry » ;

- au NPL, Teddington (Royaume-Uni), le 8 juin 2001, pour présenter le programme du BIPM dans le domaine des mesures d'ozone à l'atelier sur le projet n° 414 de l'EUROMET (ozone) ;
- à l'UNESCO, Paris (France), les 14 et 15 juin 2001, comme représentant du BIPM à l'European Conference on Environment, Health and Safety – A Challenge for Measurements.

9 LA BASE DE DONNÉES DU BIPM SUR LES COMPARAISONS CLÉS (C. THOMAS)

9.1 État d'avancement de la base de données (C. Thomas ; L. Le Mée, G. Petitgand)

L'annexe C de la base de données du BIPM sur les comparaisons clés (KCDB) a été ouverte sur le Web le 13 décembre 2000 ; elle comportait alors 286 CMCs déclarés dans le domaine des longueurs. Suite à leur approbation par le JCRB, lors de ses cinquième et sixième réunions, c'est quelque 10 000 CMCs qui se trouvaient publiés en mai 2001. Ils couvrent les domaines des longueurs, de l'électricité et magnétisme, de l'acoustique, ultrasons et vibrations, et de la photométrie et radiométrie. Les premiers CMCs relatifs à la chimie ont été publiés le 15 juin 2001 ; ils concernent uniquement les mélanges de gaz. Le moteur de recherche de l'annexe C est fondé sur les classifications de services élaborées en commun par les organisations régionales de métrologie pour chaque domaine de la métrologie. Pour la chimie, on a mis au point une recherche plus appropriée, qui utilise des mots clés.

L'annexe B de la base de données recouvre maintenant environ 360 comparaisons clés et supplémentaires réalisées sous les auspices du CIPM et des organisations régionales de métrologie. En juin 2001, on avait déjà publié les résultats d'environ vingt d'entre elles.

Maintenir l'ensemble à niveau demande un travail quotidien rigoureux et une attention constante aux décisions des Comités consultatifs. La base de données reçoit en moyenne mille visites par mois et nous prévoyons une demande plus forte dans un avenir proche, au fur et à mesure de la

publication d'autres CMCs dans les domaines de la chimie et des rayonnements ionisants.

9.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

C. Thomas s'est rendue :

- à Paris (France), le 18 octobre 2000, pour présenter la base de données du BIPM sur les comparaisons clés lors de la réunion d'octobre 2000 des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie ;
- au NIST, Gaithersburg (États-Unis), du 7 au 9 mars 2001, pour assister à la réunion de mars 2001 des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie et à la 6^e réunion du JCRB.

9.3 Activités liées au travail des Comités consultatifs

C. Thomas a assisté à :

- la réunion du Groupe de travail du CCEM pour les grandeurs aux radio-fréquences, le 12 septembre 2000 ;
- la réunion du Groupe de travail du CCEM sur les comparaisons clés, le 13 septembre 2000 ;
- la 22^e session du CCEM, les 14 et 15 septembre 2000 ;
- la réunion des représentants des organisations régionales de métrologie dans le domaine des rayonnements ionisants, le 18 septembre 2000 ;
- la réunion du Groupe de travail du CCL sur la métrologie dimensionnelle, les 19 et 20 septembre 2000 ;
- la 5^e réunion du JCRB, les 11 et 12 octobre 2000 ;
- la réunion des représentants des organisations régionales de métrologie dans le domaine de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations, les 15 et 16 février 2001 ;
- les réunions des Groupes de travail du CCQM sur l'analyse inorganique et l'analyse électrochimique, le 2 avril 2001 ;
- la réunion du Groupe de travail du CCQM sur l'analyse de gaz, le 3 avril 2001 ;
- la 7^e session du CCQM, du 4 au 6 avril 2001 ;
- la réunion du Groupe de travail du CCPR sur les comparaisons clés, le 23 avril 2001 ;

- la 16^e session du CCPR, du 24 au 26 avril 2001 ;
- la 16^e réunion de la Section II du CCRI, les 21 et 22 mai 2001 ;
- la 15^e réunion de la Section I du CCRI, le 24 mai 2001 ;
- la 14^e réunion de la Section III du CCRI, le 29 mai 2001 au matin ;
- la 17^e session du CCRI, le 29 mai 2001 l'après-midi ;
- la réunion des représentants des organisations régionales de métrologie dans le domaine de l'électricité et du magnétisme, le 26 juin 2001 au matin ;
- la réunion du Groupe de travail du CCEM pour les grandeurs aux radio-fréquences, le 26 juin 2001 l'après-midi et le 27 juin 2001 au matin ;
- la réunion du Groupe de travail du CCEM sur les comparaisons clés, le 27 juin 2001 au matin et le 28 juin 2001.

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

9.4 Visiteurs et stagiaires

- M. L. Énard (BNM), le 16 janvier 2001.
- Mlle S. Maniguet, du 5 février au 30 mars 2001.
- M. M. Cox (NPL), du 19 au 30 mars 2001.
- MM M. Cox et B. Chorley (NPL), le 8 mai 2001.
- M. G. Mattingly (NIST), le 25 juin 2001.

10 PUBLICATIONS DU BIPM

10.1 Rapports du CIPM et de ses Comités consultatifs (P.W. Martin, J.R. Miles et C. Thomas ; D. Le Coz)

Depuis juillet 2000 ont été publiés :

- *Procès-verbaux des séances du Comité international des poids et mesures*, 89^e session (2000), 2001, **68**, 134 p.

- *Rapport du directeur sur l'activité et la gestion du Bureau international des poids et mesures* (2000), 2000, **1**, 199 p.
- *Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations*, 1^{re} session (1999), 2000, 77 p.
- *Comité consultatif pour la quantité de matière*, 6^e session (2000), 2000, 94 p.
- *Comité consultatif des rayonnements ionisants*, 16^e session (1999), 2001, 203 p.
- *Comité consultatif d'électricité et magnétisme*, 22^e session (2000), 2001, 130 p.
- *Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées*, 7^e session (1999), 2000, 74 p.
- *Comité consultatif de thermométrie*, 20^e session (2000), 2001, 83 p.

Note : les publications scientifiques sont mentionnées dans le rapport dans le cadre de la section scientifique à laquelle elles se réfèrent.

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

Le volume **37** de *Metrologia* a été publié en 2000 ; il comprend cinq numéros normaux et un numéro spécial consacré aux comptes rendus de la conférence NEWRAD'99. Les numéros spéciaux sont toujours très populaires auprès de la communauté des métrologistes et nous faisons tout notre possible pour réduire les délais de publication des comptes rendus. Nous envisageons d'offrir une possibilité de soumettre directement des articles en ligne au format Acrobat PDF. Les referees auront accès grâce à un mot de passe au fichier des auteurs et pourront utiliser ce système pour soumettre leurs commentaires. Cela permettra aux auteurs de suivre l'état d'avancement de l'examen de leur article à chaque étape de la procédure éditoriale. Le système offrira plusieurs avantages : dynamiser la procédure éditoriale, faciliter la tâche des auteurs, des referees et du personnel d'édition, et améliorer l'efficacité en accélérant la circulation des articles. Nous proposons aussi un supplément technique à *Metrologia*, accessible uniquement sur le Web, consacré à la publication des résultats des comparaisons clés.

10.3 Site Internet du BIPM (J.R. Miles ; L. Le Mée)

Le site Internet du BIPM (<http://www.bipm.org/>) continue à s'étoffer et reçoit plus de neuf cents visites par jour. Cette année, nous avons introduit la possibilité de télécharger les documents de travail de plusieurs Comités consultatifs en accès restreint. Plusieurs pages relatives aux activités des sections scientifiques ont été mises à jour, et l'accès aux publications électroniques de la section du temps a été facilité. La liste de « liens utiles » a été étoffée, et le moteur de recherche proposé dans le site du BIPM est en cours d'amélioration.

11 RÉUNIONS ET EXPOSÉS AU BIPM

11.1 Réunions

Les réunions suivantes ont eu lieu au BIPM :

- Le CCEM s'est réuni le 14 septembre 2000. Il a été précédé de la réunion de son Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences (GT-RF) le 12 septembre et de son Groupe de travail sur les comparaisons clés les 13 et 14 septembre. Le GT-RF s'est réuni à nouveau le 26 juin 2001 après-midi et le 27 juin au matin, et le Groupe de travail sur les comparaisons clés le 27 juin 2001 après-midi et le 28 juin.
- Le Groupe de travail du CCL sur la métrologie dimensionnelle s'est réuni les 19 et 20 septembre 2000. Le Groupe de travail du CCL sur la mise en pratique s'est réuni les 7 et 8 décembre 2000.
- Le JCRB s'est réuni du 11 au 13 octobre 2000.
- Le Groupe de travail *ad hoc* sur la viscosité s'est réuni les 6 et 7 novembre 2000.
- Le Groupe de travail inter-régional pour l'examen des CMCs du CCAUV s'est réuni les 15 et 16 février 2001.
- Le bureau du Comité s'est réuni le 20 février 2001.
- Le CCQM s'est réuni du 4 au 6 avril 2001. Il a été précédé des réunions de ses groupes de travail les 2 et 3 avril.

- Le CCU s'est réuni les 19 et 20 avril 2001.
- Le CCPR s'est réuni du 24 au 26 avril 2001. Il a été précédé de réunions de son groupe de travail sur les comparaisons clés le 23 avril.
- Le Groupe de travail 1 (GUM) du Comité commun pour les guides en métrologie (JCGM) s'est réuni les 7 et 8 mai 2001, et le Groupe de travail 2 (VIM) le 18 avril et du 9 au 11 mai.
- Le CCRI s'est réuni le 29 mai 2001 après-midi. Il a été précédé des réunions de la Section II du 21 au 23 mai 2001 au matin, de la Section I du 23 mai après-midi au 25 mai 2001, et de la Section III les 28 et 29 mai 2001 à midi. Un groupe de travail de la Section II du CCRI s'est réuni les 1^{er} et 2 février 2001.
- Le CCTF s'est réuni les 20 et 21 juin 2001. Il a été précédé d'une réunion des laboratoires contribuant au Temps atomique international (TAI) le 19 juin 2001.

11.2 Exposés

Les exposés suivants ont été présentés au BIPM, dans le cadre des séminaires réguliers :

- M. Têtu (Université Laval, Canada) : Métrologie des fréquences optiques et besoins des télécommunications (Optical frequency standards and absolute frequency control within multiwavelength optical communications systems), le 17 novembre 2000.
- Y. Fujii (NRLM, Japon) : Benefits of levitating a mass for the measurement of mechanical quantities, le 24 novembre 2000.
- M. Cox (NPL, Royaume-Uni) : Considerations in the calculation of key comparison reference values, le 22 mars 2001.
- Ed. Williams (NIST, États-Unis) : Fundamental electrical constants and the NIST watt balance, le 6 juin 2001.

12 CERTIFICATS ET NOTES D'ÉTUDE

Du 1^{er} juillet 2000 au 30 juin 2001, 30 Certificats et 2 Notes d'étude ont été délivrés.

12.1 Certificats

2000

N ^{os}		
37.	Étalon de résistance de 100 Ω , n° 226750*	Service de la métrologie belge (IGM), Bruxelles, Belgique.
38.	Étalon de résistance de 10 000 Ω , n° 616007*	Id.
39.	Étalon de résistance de 10000 Ω , n° 508004*	Id.
40.	Étalon de résistance de 1 Ω , n° 1816192*	Id.
41.	Étalon de résistance de 1 Ω , n° 1870794*	Id.
42.	Étalon de force électromotrice à diode de Zener, n° 36778	National Centre of Metrology (NCM), Sofia, Bulgarie.
43.	Zener-diode voltage standard, No. 7 195 007	National Office of Measures (OMH), Budapest, Hungary.
44.	Zener-diode voltage standard, No. 7 195 008	Id.
45.	Zener-diode voltage standard, No. 7 195 009	Id.
46.	Zener-diode voltage standard, No. 7 195 010	Id.

* Cet étalon a déjà été étalonné au BIPM.

- | | | |
|-----|--|--|
| 47. | Étalon de force électromotrice
à diode de Zener,
n° 5 740 201* | Service de la métrologie
belge (IGM), Bruxelles,
Belgique. |
|-----|--|--|

2001

- | | | |
|-----------------|---|--|
| N ^{os} | | |
| 1. | Prototype de masse
n° 55* | République fédérale
d'Allemagne. |
| 2. | 1 kg mass standard
in platinum-iridium,
A* | National Physical Laboratory
(NPL), Teddington,
United Kingdom. |
| 3. | 1 kg mass standard
in stainless steel,
No. 83700 | Singapore Productivity and
Standards Board (PSB),
Singapore. |
| 4. | Laser à hélium-néon
de longueur d'onde 633 nm,
n° 116 | Centro Español de Metrología
(CEM), Madrid,
Espagne. |
| 5. | Laser à hélium-néon
de longueur d'onde 633 nm,
n° 68902 | Országos Mérésügyi Hivatal
(OMH), Budapest,
Hongrie. |
| 6. | Laser à hélium-néon
de longueur d'onde 633 nm,
NCM1 | National Centre of Metrology
(NCM), Sofia,
Bulgarie. |
| 7. | Laser à hélium-néon
de longueur d'onde 633 nm,
NCM2 | Id. |
| 8. | 10 pF capacitance standard,
No. 01024 | Central Office of Measures
(GUM), Warsaw, Poland. |
| 9. | 10 pF capacitance standard,
No. 01025 | Id. |
| 10. | 10 pF capacitance standard,
No. 01026 | Id. |
| 11. | 10 pF capacitance standard,
No. 01027 | Id. |
| 12. | 1 kg mass standard
in stainless steel,
MS-S-14 | Norwegian Metrology and
Accreditation Service,
Justervesenet (JV), Kjeller,
Norway. |

13.	1 kg mass standard in stainless steel, LMN1*	Id.
14.	1 kg mass standard in stainless steel, LMN5*	Id.
15.	Prototype de masse n° 36*	Norvège.
16.	Ionization chamber in gamma-ray beams NE 2561-168	Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI), Rio de Janeiro, Brazil.
17.	10 pF capacitance standard, No. K12*	Czech Metrological Institute (CMI), Brno, Czech Republic.
18.	10 pF capacitance standard, No. K15*	Id.
19.	10 000 Ω resistance standard, No. J201069130104*	Danish Institute of Fundamental Metrology (DFM), Lyngby, Denmark.

12.2 Notes d'étude

2001

N ^{os}		
1.	1 kg mass standard in platinum-iridium, No 651*	National Physical Laboratory (NPL), Teddington, United Kingdom.
2.	10 000 Ω and 12 906 Ω resistances, No. A2010800SP5121	Czech Metrological Institute (CMI), Brno, Czech Republic.

13 GESTION DU BIPM

13.1 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 2000.

13.1.1 Compte I : fonds ordinaires

Actif au 1 ^{er} janvier 2000		22 742 765,80
Recettes		
Recettes budgétaires		31 621 461,61
Taxes sur les achats remboursées		792 416,80
Réévaluation de l'actif au 31 décembre 2000		361 902,18
Total des recettes		32 775 780,59
Dépenses		
Dépenses budgétaires		30 375 791,91
Différences de change		47 232,19
Taxes sur les achats remboursables		2 690 180,15
Total des dépenses		33 113 204,25
Actif au 31 décembre 2000		22 405 342,14
Détail des recettes budgétaires		
Versement de contributions :		
Au titre de l'exercice 2000	20 820 126,00	} 28 873 264,90
Au titre de l'exercice 1999	1 128 264,00	
Au titre de l'exercice 1998	1 768 723,00	
Au titre de l'exercice 1997 et antérieurs	838 854,00	
Au titre de l'exercice 2001	3 102 987,90	
Prélèvement sur le compte « Remboursement aux États »		
	1 214 310,00	
Versement de souscriptions :		
Au titre de l'exercice 2000	102 220,80	} 174 532,89
Au titre de l'exercice 2001	72 312,09	
Intérêts des fonds		1 665 199,97
Abonnements à <i>Metrologia</i>		567 212,94
Recettes diverses		} 341 250,91
• cession de prototypes (kg)	0,00	
• divers	341 250,91	
Total des recettes		31 621 461,61

* 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.

Versement des contributions. — Les versements de contributions effectués au cours de l'année 2000 s'élèvent à 27 658 954,90 francs-or, dont 20 820 126 francs-or au titre de l'exercice 2000, 3 102 987,90 francs-or au titre de l'exercice 2001 et 3 735 841 francs-or au titre des exercices antérieurs.

Dépenses du Compte I. — Les dépenses budgétaires en 2000 se sont élevées à 30 375 791,91 francs-or. Les dépenses relatives à *Metrologia* ont été réintégrées dans les chapitres concernés en raison de la clôture du Compte VI, ce qui explique la différence entre le budget des fonds ordinaires voté par le Comité pour un montant de 32 676 000 francs-or et le montant de 33 269 000 francs-or figurant ci-dessous.

Détail des dépenses budgétaires

Chapitres	Dépenses de l'exercice	Budget voté	Économies	Dépassements
<i>A. Dépenses de personnel :</i>				
1. Traitements	12 736 484,28	13 150 000	413 515,72	—
2. Allocations familiales et sociales	2 386 896,39	2 798 000	411 103,61	—
3. Assurance maladie (a)	1 288 169,69	1 337 000	48 830,31	—
4. Assurance accidents	49 297,86	52 000	2 702,14	—
5. Caisse de retraite (b)	3 617 000,00	3 617 000	—	—
<i>B. Dépenses de fonctionnement :</i>				
1. Laboratoires et atelier	880 505,59	1 260 000	379 494,41	—
2. Chauffage, eau, électricité	454 016,59	459 000	4 983,41	—
3. Assurances	90 135,13	84 000	—	6 135,13
4. Publications	360 909,13	817 000	456 090,87	—
5. Frais de bureau	429 531,82	559 000	129 468,18	—
6. Voyages et transports de matériel	1 156 848,03	1 091 000	—	65 848,03
7. Entretien courant	466 456,26	517 000	50 543,74	—
8. Bibliothèque	473 290,50	430 000	—	43 290,50
9. Bureau du Comité	165 716,78	76 000	—	89 716,78
<i>C. Dépenses d'investissement :</i>	4 286 927,94	5 186 000	899 072,06	—
<i>D. Dépenses de bâtiments (gros travaux d'entretien et de rénovation) :</i>				
	1 292 684,20	1 115 000	—	177 684,20
<i>E. Frais divers et imprévus (c) (d) :</i>	240 921,72	721 000	480 078,28	—
Totaux	30 375 791,91	33 269 000	3 275 882,73	382 674,64

(a) Comprenant un virement de 313 429,35 francs-or au Compte II (Caisse de retraite).

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

(c) Comprenant un virement de 16 008 francs-or au Compte IV (Caisse de prêts sociaux).

13.1.2 Compte II : caisse de retraite

Actif au 1 ^{er} janvier 2000	29 090 575,69
Recettes	
Retenues sur les traitements	1 141 540,93
Virement du Compte I *	4 017 077,35
Intérêts des fonds	2 020 805,57
Réévaluation de l'actif au 31 décembre 2000	506 780,21
Total des recettes	7 686 204,06
Dépenses	
Pensions servies	5 399 407,79
Total des dépenses	5 399 407,79
Actif au 31 décembre 2000	31 377 371,96

* Comprenant un virement de 313 429,35 francs-or provenant des économies réalisées sur l'assurance maladie (*BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1994, **62**, 19).

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

Actif au 1 ^{er} janvier 2000	117 905,96
Dépenses	
Dépenses de la section des rayonnements ionisants	117 905,96
Total des dépenses	117 905,96
Actif au 31 décembre 2000	0,00

13.1.4 Compte IV : caisse de prêts sociaux

Actif au 1 ^{er} janvier 2000 hors créances	313 941,57
Recettes	
Amortissements partiels des prêts :	
Capital	129 948,54
Intérêts	4 754,71
Virement du Compte I	16 008,00
Intérêts des fonds	21 703,21
Total des recettes	172 414,46
Dépenses	
Prêts consentis en cours d'année	160 372,99
Total des dépenses	160 372,99
Actif au 31 décembre 2000 hors créances	325 983,04
Créances de la caisse de prêts sociaux	
Créances au 1 ^{er} janvier 2000	314 990,42
Créances nouvelles en cours d'année	160 372,99
Amortissements partiels des prêts (capital)	-129 948,54
Créances au 31 décembre 2000	345 414,87
Actif au 31 décembre 2000 créances incluses	671 397,91

13.1.5 Compte V : réserve pour les bâtiments

Actif au 1 ^{er} janvier 2000	10 051 645,90
Recettes	
Intérêts des fonds	527 363,94
Réévaluation de l'actif au 31 décembre 2000	71 072,24
Total des recettes	598 436,18
Dépenses	
Dépenses Pavillon du Mail	6 252 718,88
Total des dépenses	6 252 718,88
Actif au 31 décembre 1999	4 397 363,20

13.1.6 Compte VI : Metrologia

Ce compte a été clôturé, les recettes et les dépenses liées à *Metrologia* ont été imputées dans les chapitres concernés du Compte I. — Fonds ordinaires.

13.1.7 Compte VII : fonds de réserve pour l'assurance maladie

Actif au 1 ^{er} janvier 2000	2 113 650,36
Recettes	
Intérêts des fonds	138 865,23
Réévaluation de l'actif au 31 décembre 2000	36 512,39
Total des recettes	175 377,62
Dépenses	
Subvention des cotisations des retraités	29 344,27
Total des dépenses	29 344,27
Actif au 31 décembre 2000	2 259 683,71

13.1.8 Bilan au 31 décembre 2000

Compte I « Fonds ordinaires »	22 405 342,14
Compte II « Caisse de retraite »	31 377 371,96
Compte III « Fonds spécial pour l'amélioration du matériel scientifique »	0,00
Compte IV « Caisse de prêts sociaux »	671 397,91
Compte V « Réserve pour les bâtiments »	4 397 363,20
Compte VI « Metrologia »	0,00
Compte VII « Fonds de réserve pour l'assurance maladie »	2 259 683,71
Actif net	61 111 158,92
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)	4 043 581,72
2° En dollars américains (0,9305 USD = 1 EUR ; 1 USD = 3,885 055 560 FO)	13 882 876,14
3° En francs suisses (1,5232 CHF = 1 EUR ; 1 CHF = 2,373 322 084 FO)	195 978,45
4° En livres sterling (0,6241 GBP = 1 EUR ; 1 GBP = 5,792 411 791 FO)	2 358 751,60
5° En Deutsche Marks (1,95 583 DEM = 1 EUR ; 1 DEM = 1,848 342 749 FO)	924 171,37
6° En forints (265 HUF = 1 EUR ; 1 HUF = 0,013 641 676 FO)	1 758,72
7° En couronnes suédoises (8,8313 SEK = 1 EUR ; 1 SEK = 0,409 344 513 FO)	450 314,96
8° En couronnes norvégiennes (8,2335 NOK = 1 EUR ; 1 NOK = 0,439 065 306 FO)	439 065,30
9° En couronnes danoises (7,4631 DKK = 1 EUR ; 1 DKK = 0,484 389 088 FO)	9 671 003,30
10° En liras italiennes (1 936,27 ITL = 1 EUR ; 1 000 ITL = 1,867 014 516 FO)	3 547 327,58
11° En euros (1 EUR = 6,55 957 FRF = 3,615 044 199 FO)	27 110 541,05
Total des fonds déposés en banque	62 625 370,19
<i>b. Espèces en caisse :</i>	
1° En francs français (1 FRF = 0,551 109 935 FO)	15 242,49
2° En dollars américains (0,9305 USD = 1 EUR ; 1 USD = 3,885 055 560 FO)	1 291,33
3° En francs suisses (1,5232 CHF = 1 EUR ; 1 CHF = 2,373 322 084 FO)	1 578,73
4° En livres sterling (0,6241 GBP = 1 EUR ; 1 GBP = 5,792 411 791 FO)	1 908,81
5° En Deutsche Marks (1,95 583 DEM = 1 EUR ; 1 DEM = 1,848 342 749 FO)	3 947,45
6° En yens (106,92 JPY = 1 EUR ; 1 JPY = 0,033 810 739 FO)	1 174,10
7° En florins (2,20 371 NLG = 1 EUR ; 1 NLG = 1,640 435 538 FO)	2 124,77
8° En dollars canadiens (1,3965 CND = 1 EUR ; 1 CND = 2,588 646 043 FO)	965,58
9° En pesetas (166,386 ESP = 1 EUR ; 1 ESP = 0,021 726 853 FO)	648,36
10° En escudos (200,482 PTE = 1 EUR ; 1 PTE = 0,018 031 764 FO)	942,51
11° En dollars australiens (1,6770 AUD = 1 EUR ; 1 AUD = 2,155 661 419 FO)	3 841,49
12° En schillings autrichiens (13,7603 ATS = 1 EUR ; 1 ATS = 0,262 715 508 FO)	456,10
13° En couronnes norvégiennes (8,2335 NOK = 1 EUR ; 1 NOK = 0,439 065 306 FO)	8,35
14° En marks finlandais (5,94573 FIM = 1 EUR ; 1 FIM = 0,608 006 788 FO)	744,28
15° En liras italiennes (1 936,27 ITL = 1 EUR ; 1 000 ITL = 1,867 014 516 FO)	533,80
16° En dollars de Singapour (1,6126 SGD = 1 EUR ; 1 SGD = 2,241 748 852 FO)	118,36
Total des espèces en caisse	35 526,51
Actif brut (a + b)	62 660 896,70
<i>c. Créances de la Caisse de prêts sociaux</i>	345 414,87
<i>d. Provision pour remboursement aux États à déduire (1)</i>	-1 749 661,00
<i>e. Sommes reçues de l'ex-Yougoslavie à déduire</i>	-145 491,65
Actif net	61 111 158,92

(1) Compte « Remboursement aux États »	
Situation au 1 ^{er} janvier 2000	1 520 251
Versements	
Versement par le Cameroun de ses contributions de 1992, 1993, 1994 et 1995 (acompte)	338 396
Versement par le Pakistan de ses contributions de 1992 à 1998 et 1999 (acompte)	947 605
Versement par le Chili du solde de sa contribution de 1999	10 205
Versement par l'Uruguay de ses contributions de 1997 (solde) et 1998	148 353
Total des versements	1 444 559
Remboursements aux États	
Compensation du remboursement d'avances faites pour l'Argentine (1992, 1993, 1996 et 1997)	706 544
Compensation du remboursement d'avances faites pour le Chili (1993, 1997 et 1998)	386 350
Compensation du remboursement d'avances faites pour l'Uruguay (1995)	122 255
Total des versements	1 215 149
Situation au 31 décembre 2000	1 749 661

13.2 Personnel

13.2.1 Engagements

- M. Stéphane Solve, né le 31 mars 1970 à Pau (France), de nationalité française, travaillant précédemment dans le laboratoire métrologique de Météo France, a été engagé comme *assistant* dans la section de radiométrie à dater du 1^{er} février 2001.

13.2.2 Promotions et changements de grade

- M. Robert Wielgosz a été promu *chimiste principal* à dater du 1^{er} janvier 2001.
- M. Jacques Azoubib, *physicien* dans la section du temps, a été promu *physicien principal* à dater du 1^{er} janvier 2001.
- M. Włodzimierz Lewandowski, *physicien* dans la section du temps, a été promu *physicien principal* à dater du 1^{er} janvier 2001.
- M. Laurent Le Mée, *technicien principal*, a été promu *assistant* à dater du 1^{er} janvier 2001.

13.2.3 Chercheurs associés

- M. Longsheng Ma, chercheur associé à la section des longueurs depuis le 25 janvier 2000, est prolongé dans ses fonctions pour une durée d'un an.
- Mme Hao Fang, chercheuse associée dans la section des masses depuis le 1^{er} janvier 1999, est prolongée dans ses fonctions pour une durée d'un an.

13.2.4 Départs

- M. Alain Zarka, *assistant* dans la section d'électricité, a démissionné le 6 octobre 2000 après neuf ans de service, pour travailler dans une société privée au Canada.

13.3 Bâtiments

13.3.1 Petit Pavillon

- Rénovation de la décoration intérieure.

13.3.2 Bâtiment des lasers

- Remplacement du système de conditionnement d'air.

13.3.3 Observatoire

- Installation d'un système de traitement de l'air et remplacement du système de conditionnement d'air dans certains laboratoires.
- Rénovation du laboratoire de photométrie et de la salle 103.

13.3.4 Bâtiment des rayonnements ionisants

- Poursuite des travaux de rénovation des laboratoires pour la section de chimie.
- Installation d'un système de conditionnement d'air pour la section de chimie.
- Travaux en liaison avec l'installation de la nouvelle source de ^{60}Co .

13.3.5 Pavillon du Mail

- Achèvement des travaux de construction et rénovation des abords.

LISTE DES SIGLES UTILISÉS DANS LE PRÉSENT VOLUME

1 Sigles des laboratoires, commissions et conférences

AGU	American Geophysical Union, Washington DC (États-Unis)
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
AIST	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, <i>voir</i> NMIJ/AIST
ANSTO	Australian Nuclear Science and Technology Organisation, Menai (Australie)
AOS	Astrogeodynamical Observatory, Borowiec (Pologne)
ARPANSA	Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, Sydney et Melbourne (Australie)
ATF	Asia-Pacific Workshop on Time and Frequency
BARC	Bhabha Atomic Research Centre, Trombay (Inde)
BCRU	British Committee on Radiation Units
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-LPTF	Bureau national de métrologie, Laboratoire primaire du temps et des fréquences, Paris (France)
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
CEI	Commission électrotechnique internationale
CEM	Centro Español de Metrología, Madrid (Espagne)
CENAM	Centro Nacional de Metrología, Mexico (Mexique)
CGGTTS	Groupe de travail du CCTF sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant le GPS et le GLONASS/ CCTF Working Group on GPS Time Transfer Standards
CIE	Commission internationale de l'éclairage
CIPM	Comité international des poids et mesures
CIRMS	Council on Ionizing Radiation Measurements and Standards, Duluth (États-Unis)
CMA/MIKES	Mittatekniiikan Keskus/Centre for Metrology and Accreditation, Helsinki (Finlande)
CMI	Český Metrologický Institut/Czech Metrological Institute, Prague et Brno (Rép. tchèque)
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
CONICET	Argentine Council of Research
COOMET	Cooperation in Metrology among the Central European Countries

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

CPEM	Conference on Precision Electromagnetic Measurements
CRL*	Communications Research Laboratory, Tokyo (Japon), <i>voir</i> NMIJ/AIST
CRRD	Centro Regional de Referencia para la Dosimetria, Buenos Aires (Argentine)
CSAO	Shaanxi Astronomical Observatory, Lintong (Chine)
CSIR-NML	Council for Scientific and Industrial Research, National Metrology Laboratory, Pretoria (Afrique du Sud)
CSIRO	<i>voir</i> NML-CSIRO
DANOF	Département d'astronomie fondamentale de l'Observatoire de Paris, Paris (France)
EFTF	European Frequency and Time Forum
EGS	European Geophysical Society
EMPA	Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Dübendorf, Saint-Gall et Thun (Suisse)
ENEA	Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, Rome (Italie)
ENS	École normale supérieure, Paris (France)
ETL*	Electrotechnical Laboratory, Tsukuba (Japon), <i>voir</i> NMIJ/AIST
EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
FCS	Frequency Control Symposium
FTU/FZK	Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt, Karlsruhe (Allemagne)
GAW	<i>voir</i> OMM-GAW
GREX	Groupe de recherche du CNRS : gravitation et expériences (France)
GT-RF	Groupe de travail du CCEM pour les grandeurs aux radiofréquences
GUM	Glówny Urząd Miar/Central Office of Measures, Varsovie (Pologne)
HUT	Helsinki University of Technology, Helsinki (Finlande)
ICAG	International Conference of Absolute Gravimeters
ICRM	International Committee for Radionuclide Metrology
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
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
IFG	Institut for Grænseregionsforskning/Danish Institute of Border Region Studies, Helsinki (Finlande)
IFIN	Institutul de Fizica si Inginerie Nucleara, Bucarest (Roumanie)
IGEX	International GLONASS Experiment
IGGC	International Gravity and Geoid Commission
IGLOS-PP	International GLONASS Service Pilot Project
IGM	Inspection générale de la métrologie, Service de la métrologie, Bruxelles (Belgique)
IGS	International GPS Service for Geodynamics
IKE	Institut für Kernenergetik und Energiesysteme/Institute for Nuclear Technology and Energy Conversion, University of Stuttgart, Stuttgart (Allemagne)
ILP	Institut de physique des lasers, Académie des sciences de Russie, Novosibirsk (Féd. de Russie)
IMEKO	International Measurement Confederation
IMGC	Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Turin (Italie)
INM*	Institut national de métrologie, Paris (France), voir BNM-INM
INMRI	Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti, Rome (Italie)
IOP	Institute of Physics, Londres (Royaume-Uni)
IPGP	Institut de physique du Globe, Paris (France)
IPQ	Instituto Português da Qualidade, Lisbonne (Portugal)
IRA	Institut de radiophysique appliquée, Lausanne (Suisse)
IRAC	U.K. Health and Safety Commission Ionizing Radiation Advisory Committee (Royaume-Uni)
IRD*	voir LNMRI
IRK	Institut für Radiumforschung und Kernphysik, Vienne (Autriche)
IRMM	Institut des matériaux et mesures de référence, Commission européenne/Institute for Reference Materials and Measurements, European Commission
ISI	Institute of Scientific Instruments, Brno (Rép. tchèque)
ISO	Organisation internationale de normalisation

ISO/CASCO	Organisation internationale de normalisation, Comité pour l'évaluation de la conformité
IUT	Institut universitaire de technologie
IVS	International VLBI Service
JCGM	Comité commun pour les guides en métrologie/Joint Committee for Guides in Metrology
JCR	Comité mixte BIPM/UAI sur les systèmes de référence spatio-temporels et la métrologie dans le cadre de la relativité générale/BIPM/IAU Joint Committee on General Relativity for Space-Time Reference Systems and Metrology
JCRB	Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM/Joint Committee of the Regional Metrology Organizations and the BIPM
JILA	Joint Institute for Laboratory Astrophysics, Boulder CO (États-Unis)
JV	Justervesenet, Kjeller (Norvège)
KRISS	Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon (Rép. de Corée)
LCIE*	Laboratoire central des industries électriques, Fontenay-aux-Roses (France), voir BNM-LCIE
LEP	Laboratoires d'électronique Philips, Limeil-Brévannes (France)
LGC	Laboratory of the Government Chemist, Teddington (Royaume-Uni)
LNE*	Laboratoire national d'essais, Paris (France), voir BNM-LNE
LNHB*	Laboratoire national Henri Becquerel, Gif-sur-Yvette (France), voir BNM-LNHB
LNMRI	Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, Rio de Janeiro (Brésil)
LPL	Laboratoire de Physique des Lasers, Villetaneuse (France)
LPTF*	Laboratoire primaire du temps et des fréquences, Paris (France), voir BNM-LPTF
MAC	U.K. Department of Trade and Industry Measurement Advisory Committee (Royaume-Uni)
METAS	(ex OFMET) Office fédéral de métrologie et d'accréditation, Wabern (Suisse)
MIKES*	Mittatekniikan Keskus, Helsinki (Finlande), voir CMA

MRA	Arrangement de reconnaissance mutuelle/Mutual Recognition Arrangement
NBS*	National Bureau of Standards (États-Unis), <i>voir</i> NIST
NCM	National Centre of Metrology, Sofia (Bulgarie)
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)
NMIJ/AIST	National Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba (Japon)
NMi VSL	Nederlands Meetinstituut, Van Swinden Laboratorium, Delft (Pays-Bas)
NML	National Metrology Laboratory, Dublin (Irlande)
NML-CSIRO	National Measurement Laboratory, CSIRO, Pretoria (Australie)
NPL	National Physical Laboratory, Teddington (Royaume-Uni)
NPLI	National Physical Laboratory of India, New Delhi (Inde)
NRC-CNRC	Conseil national de recherches du Canada, Ottawa (Canada)
NRL	U.S. Naval Research Laboratory, Washington DC (États-Unis)
NRLM*	National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba (Japon), <i>voir</i> NMIJ/AIST
NTAG	New Techniques for Absolute Gravimeters Workshop
OFMET*	Office fédéral de métrologie/Eidgenössisches Amt für Messwesen, Wabern (Suisse), <i>voir</i> METAS
OIML	Organisation internationale de métrologie légale
OMH	Országos Mérésügyi Hivatal, Budapest (Hongrie)
OMM/GAW	Organisation météorologique mondiale, Global Atmosphere Watch programme, Genève (Suisse)
OMP	Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse (France)
ONERA	Office national d'études et de recherches aérospatiales, Châtillon (France)
OP	Observatoire de Paris (France)
PSB	(ex SISIR) Singapore Productivity and Standards Board (Singapour)
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig et Berlin (Allemagne)

PTTI	Precise Time and Time Interval Applications and Planning Meeting
RC	Radioisotope Centre, Otwock/Swierk (Pologne)
RCMA	Groupe de travail de l'UAI sur la relativité en mécanique céleste et en astrométrie/IAU Working Group on Relativity for Celestial Mechanics and Astrometry
RCMAM	Groupe de travail de l'UAI sur la relativité en mécanique céleste, en astrométrie et dans le domaine de la métrologie/ IAU Working Group on Relativity for Celestial Mechanics, Astrometry and for Metrology
SAO	Smithsonian Astronomical Observatory, Cambridge MA (États-Unis)
SMU	Slovenský Metrologický Ústav/Slovak Institute of Metrology, Bratislava (Slovaquie)
SP	SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut/ Swedish National Testing and Research Institute, Borås (Suède)
SPIE	International Society for Optical Engineering
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
TempMeko	International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science
UAI	Union astronomique internationale
UICPA	Union internationale de chimie pure et appliquée
UIPPA	Union internationale de physique pure et appliquée
UIT	Union internationale des télécommunications
UME	Ulusal Metroloji Enstitüsü/National Metrology Institute, Marmara Research Centre, Gebze-Kocaeli (Turquie)
UNESCO	Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture/United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USNO	U.S. Naval Observatory, Washington DC (États-Unis)
VNIIFTRI	Institut des mesures physico-techniques et radiotechniques, Gosstandart de Russie, Moscou (Féd. de Russie)
VNIIM	Institut de métrologie D.I. Mendéléev, Gosstandart de Russie, Saint-Pétersbourg (Féd. de Russie)
VSL*	Van Swinden Laboratorium, Delft (Pays-Bas), voir NMI VSL

2 Sigles des termes scientifiques

ACES	Atomic Clock Ensemble in Space
AUV	Acoustique, ultrasons et vibrations
CMC	Aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages/ Calibration and Measurement Capabilities
EAL	Échelle atomique libre
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GUM	Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure
ICRF	International Celestial Reference Frame
ICRS	International Celestial Reference System
ITRF	Système de référence terrestre spécifié par le Service international de la rotation terrestre
JAVS	Étalons de tension à réseau de Josephson/Josephson Array Voltage Standard
JPS	Javad Positioning System
KCDB	Base de données du BIPM sur les comparaisons clés/ BIPM Key Comparison Database
KTP	Potassium titanyle phosphate
SI	Système international d'unités
SIR	Système international de référence pour les mesures d'activité d'émetteurs de rayonnement gamma
SQUID	Interféromètre quantique supraconducteur/ Superconducting Quantum Interference Devices
TAI	Temps atomique international
TDCR	Méthode du rapport des coïncidences triples aux coïncidences doubles/Triple-to-double Coincidence Ratio Method
TOFS	Étalons à fréquence optique transportables/Transportable optical frequency standards
TT	Temps terrestre
TWSTFT	Comparaison de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite/Two-way Satellite Time and Frequency Transfer
UTC	Temps universel coordonné
VIM	Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie
VLBI	Interférométrie à très longue base/Very Long Baseline Interferometry