

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 2001 – 30 juin 2002)

Note sur l'utilisation du texte anglais (*voir* page 133)

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 92-822-2194-6

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 2001 – 30 juin 2002) 19

- 1 Introduction **21**
 - 1.1 Introduction générale et résumé des travaux scientifiques **21**
 - 1.2 Publications, conférences et voyages du directeur **30**
 - 1.2.1 Publications extérieures **30**
 - 1.2.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **30**
 - 1.3 Activités du directeur en liaison avec des organisations extérieures **31**
- 2 Longueurs **31**
 - 2.1 Comparaisons et mesures absolues de fréquence **31**
 - 2.2 Lasers asservis **32**
 - 2.2.1 Lasers à He-Ne asservis sur le méthane à $\lambda \approx 3,39 \mu\text{m}$ en cuve interne et externe **32**
 - 2.2.2 Lasers à diode asservis sur le rubidium à $\lambda \approx 778 \text{ nm}$ en utilisant les composantes hyperfines des transitions 5S-5D à deux photons **33**
 - 2.2.3 Lasers à He-Ne asservis sur l'iode à $\lambda \approx 633 \text{ nm}$ **33**
 - 2.2.4 Lasers à He-Ne asservis sur l'iode à $\lambda \approx 543 \text{ nm}$ **34**
 - 2.2.5 Lasers à Nd:YAG asservis sur l'iode à $\lambda \approx 532 \text{ nm}$ **34**
 - 2.2.6 Lasers à Nd:YVO₄ asservis sur l'iode à $\lambda \approx 532 \text{ nm}$ pour la métrologie dimensionnelle **34**
 - 2.3 Cuves à iode **35**
 - 2.4 Interférométrie laser pour les mesures de déplacement **35**
 - 2.5 Gravimétrie **35**
 - 2.6 Publications, conférences et voyages : section des longueurs **36**
 - 2.6.1 Publications extérieures **36**
 - 2.6.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **37**

- 2.7 Activités liées au travail des Comités consultatifs **39**
- 2.8 Visiteurs de la section des longueurs **40**
- 3 Masses et grandeurs apparentées **41**
 - 3.1 Prototypes et étalons **41**
 - 3.2 Détermination de la masse volumique de l'air à l'aide de trois méthodes **42**
 - 3.3 Balance hydrostatique **44**
 - 3.4 Adsorption de vapeur d'eau sur des masses étalons par la méthode ellipsométrique **45**
 - 3.5 Balance de torsion pour la mesure de G **46**
 - 3.6 Pression **47**
 - 3.7 Susceptomètre magnétique du BIPM **47**
 - 3.8 Publications, conférences et voyages : section des masses **47**
 - 3.8.1 Publications extérieures **47**
 - 3.8.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **48**
 - 3.9 Activités liées au travail des Comités consultatifs **49**
 - 3.10 Visiteurs de la section des masses **49**
- 4 Temps **50**
 - 4.1 Temps atomique international (TAI) et Temps universel coordonné (UTC) **50**
 - 4.2 Algorithmes pour les échelles de temps **50**
 - 4.2.1 Stabilité de l'EAL **50**
 - 4.2.2 Exactitude du TAI **51**
 - 4.3 Liaisons horaires **51**
 - 4.3.1 Mesures utilisant le code du Global Positioning System (GPS) et du Global Navigation Satellite System (GLONASS) **52**
 - 4.3.2 Mesures de phase et de code des récepteurs géodésiques **53**
 - 4.3.3 Comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite **54**
 - 4.4 Pulsars **54**
 - 4.5 Références spatio-temporelles **55**
 - 4.6 Autres études **55**
 - 4.7 Publications, conférences et voyages : section du temps **56**
 - 4.7.1 Publications extérieures **56**
 - 4.7.2 Publications du BIPM **57**

- 4.7.3 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **57**
- 4.8 Activités en liaison avec des organisations extérieures **59**
- 4.9 Activités liées au travail des Comités consultatifs **60**
- 4.10 Visiteurs de la section du temps **60**
- 5 Électricité **61**
 - 5.1 Potentiel électrique : effet Josephson **61**
 - 5.1.1 Mesures de réseaux de jonctions de Josephson **61**
 - 5.1.2 Projet 429 de l'EUROMET : comparaison d'étalons de tension de 10 V **61**
 - 5.1.3 Mesures de diodes de Zener **62**
 - 5.2 Résistance électrique et impédance **62**
 - 5.2.1 Mesures de résistance en courant continu **62**
 - 5.2.2 Conservation d'un étalon de référence de capacité et étalonnages de capacités **63**
 - 5.3 Automatisation des mesures de tension **64**
 - 5.4 Détermination du bruit et de la stabilité des étalons de tension et des nanovoltmètres **65**
 - 5.5 Comparaisons clés continues du BIPM d'étalons électriques **66**
 - 5.6 Étalonnages **66**
 - 5.7 Publications, conférences et voyages : section d'électricité **67**
 - 5.7.1 Rapports BIPM **67**
 - 5.7.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **67**
 - 5.8 Activités en liaison avec des organisations extérieures **68**
 - 5.9 Activités liées au travail des Comités consultatifs **68**
 - 5.10 Visiteurs de la section d'électricité **69**
- 6 Radiométrie, photométrie et thermométrie **69**
 - 6.1 Radiométrie **69**
 - 6.2 Photométrie **70**
 - 6.3 Thermométrie **71**
 - 6.4 Étalonnages **72**
 - 6.5 Publications, conférences et voyages : section de radiométrie, photométrie et thermométrie **72**
 - 6.5.1 Publications extérieures **72**
 - 6.5.2 Rapport BIPM **72**
 - 6.5.3 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **72**

- 6.6 Activités liées au travail des Comités consultatifs **73**
- 6.7 Visiteurs de la section de radiométrie, photométrie, thermométrie **73**
- 7 Rayonnements ionisants **74**
 - 7.1 Rayons x et γ **74**
 - 7.1.1 Calculs de Monte Carlo pour la nouvelle source de ^{60}Co **74**
 - 7.1.2 Étalons et équipements pour la dosimétrie **75**
 - 7.1.3 Comparaisons de dosimétrie **75**
 - 7.1.4 Étalonnage d'étalons nationaux pour la dosimétrie **77**
 - 7.2 Radionucléides **77**
 - 7.2.1 Comparaisons clés internationales de mesures d'activité **77**
 - 7.2.2 Système international de référence pour la mesure d'activité d'émetteurs de rayonnement gamma (SIR) **79**
 - 7.2.3 Courbe d'efficacité du SIR **80**
 - 7.2.4 Mise en œuvre de la méthode du rapport des coïncidences triples aux coïncidences doubles (TDCR) **81**
 - 7.2.5 Spectrométrie de rayonnement gamma **81**
 - 7.3 Publications, conférences et voyages : section des rayonnements ionisants **81**
 - 7.3.1 Publications extérieures **81**
 - 7.3.2 Rapports BIPM **82**
 - 7.3.3 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **83**
 - 7.4 Activités en liaison avec des organisations extérieures **84**
 - 7.5 Activités liées au travail des Comités consultatifs **84**
 - 7.6 Visiteurs de la section des rayonnements ionisants **85**
 - 7.7 Stagiaires, chercheurs invités et étudiants **85**
- 8 Chimie **86**
 - 8.1 Programme de comparaisons d'étalons de référence mesureurs d'ozone **86**
 - 8.2 Équipements pour les étalons primaires de dioxyde d'azote **86**
 - 8.3 Équipements pour le titrage en phase gazeuse **87**
 - 8.4 Équipements pour les comparaisons d'étalons d'oxyde d'azote **87**

- 8.5 Publications, conférences et voyages : section de chimie **87**
 - 8.5.1 Publications extérieures **87**
 - 8.5.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **88**
- 8.6 Activités en liaison avec des organisations extérieures **89**
- 8.7 Activités liées au travail des Comités consultatifs **90**
- 8.8 Visiteurs de la section de chimie **90**
- 8.9 Chercheur invité **90**
- 9 La base de données du BIPM sur les comparaisons clés **91**
 - 9.1 État d'avancement de la base de données **91**
 - 9.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) **92**
 - 9.3 Activités liées au travail des Comités consultatifs **92**
 - 9.4 Visiteurs et stagiaires **93**
- 10 Informatique et qualité **93**
 - 10.1 Informatique **93**
 - 10.2 Systèmes qualité **94**
 - 10.3 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) : section informatique et qualité **95**
 - 10.4 Visiteurs de la section informatique et qualité **95**
- 11 Publications du BIPM **96**
 - 11.1 Rapports du CIPM et de ses Comités consultatifs **96**
 - 11.2 Metrologia **96**
- 12 Réunions et exposés au BIPM **97**
 - 12.1 Réunions **97**
 - 12.2 Exposés **98**
- 13 Certificats et Notes d'étude **99**
 - 13.1 Certificats **99**
 - 13.2 Notes d'étude **107**
- 14 Gestion du BIPM **109**
 - 14.1 Comptes **109**
 - 14.1.1 Compte I : fonds ordinaires **109**
 - 14.1.2 Compte II : caisse de retraite **111**
 - 14.1.3 Compte III : fonds spécial pour l'amélioration du matériel scientifique **111**
 - 14.1.4 Compte IV : caisse de prêts sociaux **112**
 - 14.1.5 Compte V : réserve pour les bâtiments **112**
 - 14.1.6 Compte VI : Metrologia **113**

- 14.1.7 Compte VII : fonds de réserve pour l'assurance maladie **113**
- 14.1.8 Bilan au 31 décembre 2001 **114**
- 14.2 Personnel **116**
 - 14.2.1 Engagements **116**
 - 14.2.2 Promotions et changements de grade **116**
 - 14.2.3 Changements et transferts de postes **117**
 - 14.2.4 Chercheurs associés **117**
 - 14.2.5 Départs **118**
- 14.3 Bâtiments **118**
 - 14.3.1 Petit Pavillon **118**
 - 14.3.2 Grand Pavillon **118**
 - 14.3.3 Bâtiment des lasers **118**
 - 14.3.4 Observatoire **119**
 - 14.3.5 Bâtiment des rayonnements ionisants **119**
 - 14.3.6 Pavillon du Mail **119**
 - 14.3.7 Extérieurs et parc **119**

Liste des sigles utilisés dans le présent volume 121

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

au 1^{er} juillet 2002

États membres de la Convention du Mètre

Afrique du Sud	Irlande
Allemagne	Israël
Argentine	Italie
Australie	Japon
Autriche	Malaisie
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	Yougoslavie
Iran (Rép. islamique d')	

Associés à la Conférence générale

Cuba	Lituanie
Équateur	Malte
Hong Kong, Chine	Philippines
Lettonie	Taipei chinois

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 2002

Directeur : M. T.J. Quinn

Sous-directeur, directeur désigné : M. A.J. Wallard

Longueurs : M. A.J. Wallard

M. R. Felder, Mme S. Picard, M. L. Robertsson, M. L.-S. Ma¹,

M. L.F. Vitouchkine

M. J. Labot

Masse : M. R.S. Davis

Mme H. Fang, Mme C. Goyon-Taillade, M. A. Picard, M. H.V. Parks²

Mme J. Coarasa, M. J. Hostache

Temps : Mme E.F. Arias

MM. J. Azoubib, Z. Jiang², 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. M. Stock

MM. R. Goebel, S. Solve

Rayonnements ionisants : Mme P.J. Allisy-Roberts

M. D.T. Burns, Mme C. Michotte, M. G. Ratel, Mme C. Kessler²

MM. C. Colas, M. Nonis, P. Roger, C. Veyradier³

Chimie : M. R. Wielgosz

M. M. Esler, Mme J. Viallon

Publications : M. P.W. Martin

Mme J.R. Miles

Base de données du BIPM sur les comparaisons clés : Mme C. Thomas³

Mme S. Maniguet²

Informatique et qualité: M. R. Köhler

MM. L. Le Mée, G. Petitgand

Secrétariat : Mme F. Joly

Mmes D. Le Coz³, G. Négadi, J. Varenne

Finances, administration : Mme B. Perent

M. F. Ausset

Mmes D. Etter, M.-J. Martin, D. Saillard³

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

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

Jardiniers : MM. C. Dias-Nunes, A. Zongo⁴

Atelier de mécanique et entretien des bâtiments : M. J. Sanjaime

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

P. Lemartrier, D. Rotrou,

MM. E. Dominguez⁵, C. Neves⁵

Directeur honoraire : M. P. Giacomo

-
- 1 Chercheur associé supérieur.
 - 2 Chercheur associé(e).
 - 3 Également aux publications.
 - 4 Également à l'atelier.
 - 5 Également à l'entretien des bâtiments.

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

(1^{er} juillet 2001 – 30 juin 2002)

1 INTRODUCTION

1.1 Introduction générale et résumé des travaux scientifiques

Dans le passé, le rapport annuel du directeur sur l'activité et la gestion du Bureau international des poids et mesures (BIPM) mentionnait peu certains services fournis par le BIPM, non directement liés aux travaux scientifiques, qui ont pris récemment une importance croissante et auxquels le personnel scientifique de haut niveau consacre de plus en plus de temps. Je commencerai le rapport de cette année par des remarques relatives à ces services.

Un questionnaire a été envoyé en novembre 2001 aux directeurs des laboratoires nationaux de métrologie au sujet des services fournis par le BIPM. Ces derniers étaient classés sous les rubriques suivantes :

- A les deux services spécifiques aux masses et au temps ;
- B les étalonnages relatifs aux autres grandeurs ;
- C les comparaisons clés relatives aux étalons de référence du BIPM, effectuées de manière continue ;
- D le transfert de technologie et d'expertise ;
- E les travaux de recherche et de développement concernant des étalons ou des matériaux de référence uniques ou des étalons de transfert ;
- F l'aide aux Comités consultatifs et aux groupes de travail ;
- G le site Web du BIPM ;
- H la base de données du BIPM sur les comparaisons clés ;
- I les publications ;
- J la représentation auprès d'autres organisations internationales au nom des laboratoires nationaux de métrologie ;
- K l'établissement de liaisons officielles avec d'autres organisations ;
- L les autres services et activités.

Les services qui ne sont pas directement liés au travail scientifique sont essentiellement ceux répertoriés aux points D, F, J et K dans la liste ci-dessus. Les réponses des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie au questionnaire de novembre 2001 montrent clairement l'importance que ces services revêtent maintenant et la valeur que les directeurs y attachent.

Les responsables des sections scientifiques du BIPM consacrent une grande partie de leur temps à aider les Comités consultatifs, point F, mais ce service fait gagner beaucoup de temps aux Comités consultatifs et contribue à leur efficacité. Cette année, bien des efforts ont été consacrés à la rédaction des rapports finaux des comparaisons clés et à effectuer la liaison entre les comparaisons clés du CIPM et celles des organisations régionales de métrologie. Le transfert de technologie, point D, s'effectue à l'occasion des étalonnages et pendant les comparaisons ; ceux-ci constituent un moyen efficace de diffuser l'expertise et l'expérience du personnel scientifique du BIPM à de nombreux petits laboratoires nationaux de métrologie.

Le directeur du BIPM consacre beaucoup de temps à deux autres activités, points J et K, que les directeurs des laboratoires nationaux de métrologie considèrent comme de plus en plus importantes. Cette année, nous en trouvons des exemples dans la participation du BIPM à la création de deux nouveaux comités : le Comité commun pour la traçabilité en médecine de laboratoire, principalement en collaboration avec l'IFCC, l'ILAC et l'OMS, et le Comité commun pour la coordination de l'assistance aux pays en voie de développement dans les domaines de la métrologie, de l'accréditation et de la normalisation, principalement en collaboration avec la CEI, l'ISO, l'OIML et l'UNIDO. Chacun à leur manière, ces comités communs montrent quelles peuvent être les responsabilités à venir du BIPM. De plus, des accords officiels ont été ou seront conclus entre le CIPM et l'Organisation météorologique mondiale au sujet de la fiabilité des données relatives aux études sur le climat du Globe, et avec l'Organisation mondiale de la santé à propos de la traçabilité en médecine de laboratoire.

Le succès des activités et services mentionnés aux rubriques D, F, J et K est dû à l'expertise scientifique du personnel du BIPM et à la crédibilité résultant de sa participation aux activités de laboratoire. C'est pour cette raison qu'étendre les activités de laboratoire du BIPM à la chimie organique et à bioanalyse s'avérera essentiel dans l'avenir.

Pour ce qui est des travaux scientifiques effectués dans les laboratoires du BIPM, j'en donnerai tout d'abord un bref résumé avant de les présenter plus en détail section par section. Ce rapport est écrit de manière à présenter l'état des travaux en cours à la date du 1^{er} juillet 2002. Les publications mentionnées sont celles qui ont été publiées depuis le précédent rapport, daté du 1^{er} juillet 2001.

Longueurs : Le travail de la section des longueurs a été profondément transformé par les progrès récents dans le domaine de la métrologie des peignes de fréquence optique. Ils ont permis de réaliser des étalonnages, liés

directement aux étalons primaires de fréquence, de la fréquence de lasers dans le domaine du visible, à des niveaux d'exactitude excédant de loin ceux que l'on obtient par battement de fréquence et au moyen de chaînes de fréquence.

Nous avons donc réorienté nos activités : il a été mis fin au programme classique du BIPM d'étalonnage hétérodyne de lasers asservis sur l'iode dans le rouge, et un système à peigne correspondant à l'état de l'art a été mis au point. Celui-ci nous permet d'effectuer des mesures absolues de fréquence d'un grand nombre de systèmes lasers appartenant à des laboratoires nationaux de métrologie. Le laser à Nd:YAG du BIPM asservi sur l'iode dans le vert continue à offrir une stabilité à court terme exceptionnelle ; il a été utilisé lors de plusieurs comparaisons entre le BIPM et des laboratoires nationaux de métrologie.

Je suis heureux de rendre hommage à cette occasion au travail de J.-M. Chartier, responsable de la section des longueurs, qui a pris sa retraite en février 2002, juste trente ans après avoir débuté la longue série de comparaisons de lasers à He-Ne à la longueur d'onde de 633 nm. Pendant tout ce temps, les comparaisons de lasers effectuées par le BIPM ont fourni la référence de base assurant l'uniformité des mesures de longueur dans le monde.

Nous avons déjà effectué un certain nombre de comparaisons et d'étalonnages de systèmes lasers appartenant à des laboratoires nationaux de métrologie tout en continuant à améliorer les performances du générateur de peignes du BIPM. Un deuxième peigne est en fabrication pour permettre au BIPM d'étudier d'éventuels effets systématiques et d'acquérir de l'expérience afin de préparer un système portable qui répondra aux besoins futurs des laboratoires nationaux de métrologie pour des étalonnages et des comparaisons sur place.

Nous étudions aussi la possibilité d'étendre la technique des peignes de fréquence au proche infrarouge par différentes méthodes. Si nous y parvenons, nous aurons la possibilité de vérifier la fréquence de systèmes laser à He-Ne asservis sur le méthane, mesurée jusqu'ici au moyen de chaînes de fréquence complexes. Ces lasers intéressent particulièrement les laboratoires nationaux qui appuient leurs chaînes de fréquence sur des lasers de ce type, utilisés comme référence intermédiaire.

Un programme restreint de métrologie dimensionnelle maintient les compétences de base du BIPM dans le domaine de l'interférométrie par déplacement. Il nous permet de continuer à améliorer les performances des

gravimètres et d'autres applications pour nos propres besoins. Dans le domaine de la gravimétrie proprement dit, la sixième comparaison internationale de gravimètres, incluant des gravimètres absolus et relatifs, s'est achevée à l'été 2001. Des mesures de g d'exactitude élevée ont été effectuées dans le micro-réseau gravimétrique de référence du BIPM, et nous avons beaucoup appris quant aux performances de ces instruments et à la manière de les améliorer.

Masses : Les États membres de la Convention du Mètre continuent à s'intéresser au ré-étalonnage des prototypes nationaux du kilogramme. Depuis la troisième vérification périodique des prototypes nationaux du kilogramme (1988-1992), quatorze prototypes ont été renvoyés au BIPM pour être étalonnés à nouveau. Contrairement à ce qui avait été fait lors de la troisième vérification périodique, le nettoyage-lavage des prototypes par le BIPM est laissé au choix de chaque laboratoire national. Six laboratoires seulement ont choisi de confier au BIPM le nettoyage-lavage de leur prototype. Les résultats obtenus à ce jour sont résumés dans un document du CCM. Les prototypes (témoins) du BIPM sont utilisés comme étalons de référence pour ces étalonnages, et il est donc d'une importance fondamentale de conserver ces étalons. Nos comparaisons de mesures de masse volumique dans l'air déterminées simultanément au moyen de l'équation d'état recommandée par le CIPM et au moyen d'artefacts spécialement conçus pour la détermination de la poussée de l'air nous ont permis de conclure : 1) que la masse volumique de l'air déterminée au moyen de ces artefacts présente un écart systématique de 1×10^{-4} en valeur relative par rapport à la masse volumique de l'air déterminée à partir de l'équation d'état ; 2) que l'incertitude potentielle de la méthode des artefacts est de 1×10^{-5} en valeur relative ; et 3) qu'il faut prendre grand soin de ces artefacts pour en tirer le meilleur parti. Une grande partie de ce travail a été réalisé en collaboration avec la PTB. L'écart observé entre les deux méthodes est en accord avec l'incertitude habituellement assignée à l'équation d'état. La nouvelle balance hydrostatique est maintenant tout à fait opérationnelle. L'année passée, l'appareil avait été utilisé de manière légèrement différente pour déterminer le gradient gravitationnel vertical *in situ*. Un nouvel ellipsomètre a été constitué pour étudier les variations de l'état de surface des étalons de masse en fonction de l'humidité et du temps.

Un appareil amélioré pour la détermination de G , la constante newtonienne de gravitation, a été conçu et est en fabrication. Certains composants de ce nouvel appareil ont déjà été vérifiés. Les modes parasites sont très réduits par

rapport à ceux de notre ancien instrument, et l'asservissement a été amélioré au moyen d'un filtrage numérique.

Temps : La procédure de calcul du Temps atomique international (TAI) a été dans une grande mesure automatisée, permettant ainsi d'accélérer la publication de la *Circulaire T* mensuelle du BIPM. La stabilité à moyen terme du 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. L'exactitude du TAI est fondée sur six étalons primaires de fréquence, dont deux fontaines à césium (NIST-F1 et PTB CSF1). L'unité d'échelle du TAI correspond, selon nos estimations, à la seconde du SI à 2×10^{-15} près depuis août 2001. 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. Le réseau des liaisons horaires utilisé pour le calcul du TAI, traditionnellement fondé sur les observations simultanées réalisées avec des récepteurs du GPS à un seul canal utilisant le code C/A, s'appuie maintenant sur les résultats obtenus par six récepteurs du GPS à canaux multiples. De plus, neuf liaisons horaires sont réalisées par la méthode d'aller et retour. La section a organisé et mis en œuvre des campagnes d'étalonnage de récepteurs du GPS. Deux masers à hydrogène actifs sont installés dans le laboratoire de la section du temps depuis la fin de l'année 2001 ; ils sont utilisés pour des expériences de transfert de temps et de fréquence et fournissent la référence de fréquence pour la section des longueurs.

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 a la responsabilité, conjointement avec l'USNO, d'établir des conventions à utiliser pour déterminer 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 : La section d'électricité continue à participer aux comparaisons clés et à l'évaluation de leurs résultats. Elle contribue aussi à établir la liaison entre les résultats des comparaisons clés du CIPM et des organisations régionales de métrologie. Nous avons terminé cette année deux nouvelles

comparaisons bilatérales dans le cadre de la comparaison clé en continu d'étalons de tension dont le BIPM est responsable. Nous avons participé à la comparaison clé CCEM-K10 d'étalons de résistance de 100 Ω . De plus, une comparaison bilatérale a été effectuée à la suite des comparaisons clés CCEM-K4 et EUROMET.EM-K4 d'étalons de capacité de 10 pF et de 100 pF. Nous participons à un projet de l'EUROMET destiné à étudier des réseaux de jonctions de Josephson programmables de 1 V qui présentent des performances bien meilleures que celles des réseaux classiques. Nous avons démontré que les réseaux programmables peuvent être utilisés pour mesurer une cellule étalon directement sans craindre de modifier sa force électromagnétique propre. Des travaux sont en cours pour automatiser le plus possible les mesures de tension au BIPM, projet qui implique de mettre au point des réseaux de connexion de haute qualité. Nous estimons l'incertitude de notre réalisation actuelle de la représentation du farad fondée sur la valeur recommandée de la constante de von Klitzing à 4×10^{-8} en valeur relative. Un programme a débuté pour réduire cette incertitude. Nous voulons maintenant améliorer les performances et la détermination des caractéristiques de la résistance calculable alternatif-continu qui relie les mesures effectuées à des fréquences de l'ordre du kilohertz à celles effectuées à très basses fréquences (1 Hz). Des efforts considérables ont été consacrés cette année à la rénovation complète des trois bains d'huile, datant de trente ans, qui maintiennent nos étalons de résistance à une température constante. En collaboration avec un collègue du METAS et à la demande du CCEM, une nouvelle version du document de 1988 « Technical Guidelines for Reliable dc Measurements of the Quantized Hall Resistance » a été préparée pour être discutée lors de la session du CCEM de septembre 2002. Les travaux se poursuivent sur la détermination de la stabilité et du bruit des étalons de tension et des nanovoltmètres. Des étalonnages ont été effectués pour les laboratoires nationaux de métrologie de huit États membres.

Radiométrie, photométrie : La comparaison internationale de mesures de sensibilité spectrale dans le visible, dont le BIPM est le laboratoire pilote, est terminée. Le projet A de rapport a été envoyé récemment aux participants. Un supplément présentant les résultats, par rapport à la valeur de référence calculée au moyen de diverses méthodes, est en préparation. Le radiomètre cryogénique a été utilisé pour continuer les étalonnages périodiques de nos récepteurs de référence qui servent de fondement aux mesures absolues en photométrie et en radiométrie.

Une coopération a débuté avec le NMIJ (Japon) au sujet de la détermination des caractéristiques de points fixes des eutectiques métal-carbone, qui

pourraient à l'avenir améliorer l'échelle de température. Un chercheur invité du NMIJ travaillera pendant un an au BIPM à la mise au point d'un four à haute température équipé de creusets à points fixes pour réaliser les plateaux de fusion. Il est envisagé de mesurer leur température thermodynamique au moyen de radiomètres à filtre étalonnés par rapport à notre radiomètre cryogénique.

Suite à la décision du CIPM en 2001, les valeurs assignées aux groupes de lampes conservant les unités photométriques d'intensité et de flux lumineux au BIPM ont été ajustées sur les valeurs de référence des comparaisons clés correspondantes. Les étalonnages de lampes photométriques pour les laboratoires nationaux de métrologie de plusieurs États membres de la Convention du Mètre ont repris après un arrêt pendant lequel le laboratoire a été rénové.

En septembre 2001 le CCT a décidé d'effectuer une comparaison clé de cellules à point triple de l'eau et a chargé le BIPM de l'organiser. Un protocole technique a été mis au point en collaboration étroite avec le BNM-INM et le NIST. Il s'agit de comparer directement des cellules à point triple de l'eau de haute qualité, afin de déterminer la reproductibilité de la température du point triple de l'eau, et aussi de comparer des cellules utilisées comme références nationales. La comparaison sera organisée en étoile, chaque cellule étant mesurée par le laboratoire correspondant et envoyée au BIPM pour comparaison. Deux membres du personnel du BNM-INM et de l'UME nous aideront pendant les six mois que dureront les mesures. Le laboratoire de thermométrie a été modernisé pour les besoins de cette comparaison, afin de réduire l'incertitude de mesure.

Rayonnements ionisants : Le renouvellement des équipements se poursuit ; la conception et la construction d'un diviseur de tension pour le générateur de haute tension à polarité négative du tube à rayons x aux énergies moyennes sont maintenant terminées. La nouvelle source de ^{60}Co est maintenant équipée de systèmes de protection et est à l'étude : un nouveau code de Monte Carlo est utilisé pour simuler le faisceau de rayonnement du ^{60}Co afin d'aider à déterminer ses caractéristiques ainsi que les facteurs de correction appropriés. Huit comparaisons de dosimétrie, impliquant six laboratoires nationaux de métrologie, et vingt-neuf étalonnages pour neuf laboratoires nationaux de métrologie, ont aussi été effectués cette année dans plusieurs faisceaux de photons. Suite à la décision du CCRI, les résultats de la comparaison de dosimétrie ont été ré-analysés avant leur inclusion dans l'annexe B de la base de données du BIPM sur les comparaisons clés et, une fois approuvés par les participants, ils y figureront. Dans le domaine des

radionucléides, cinq comparaisons clés sont en cours, et les résultats de la comparaison de ^{238}Pu ont déjà été analysés. Les quatre autres comparaisons de mesures d'activité concernent le ^{204}Tl , le ^{32}P , le ^{65}Zn et le ^{241}Am , chaque comparaison comprenant jusqu'à vingt-deux laboratoires nationaux de métrologie participants. Les rapports de deux comparaisons précédentes, de ^{152}Eu et de ^{89}Sr , sont en préparation. Douze laboratoires ont soumis dix-huit radionucléides différents au Système international de référence (SIR) cette année. Le nombre total de radionucléides faisant l'objet de comparaisons clés du BIPM correspondant au SIR est maintenant de soixante-deux, suite à l'inclusion de deux nouveaux radionucléides, le ^{18}F (dont la période est inférieure à deux heures) et le ^{222}Rn , qui est un gaz. Le Groupe de travail sur les comparaisons clés prépare les résultats relatifs aux radionucléides mesurés dans le SIR pour inclusion dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés. Le travail se poursuit sur les courbes d'efficacité du SIR afin de réduire les incertitudes. Les niveaux d'activité des impuretés de cinq radionucléides soumis au SIR ont été mesurés avec le spectromètre gamma Ge(Li) du BIPM. L'étude du spectromètre HPGe et de la méthode améliorée du rapport des coïncidences triples aux coïncidences doubles mise au point pour la mesure absolue des émetteurs de rayonnements bêta purs se poursuit.

Chimie : La collaboration entre le NIST et le BIPM sur les étalons mesureurs d'ozone se poursuit. Deux photomètres étalons de référence (SRP 27 et 28) ont été comparés aux instruments en fonctionnement au NIST, puis ont été installés au BIPM. Les instruments sont en bon accord, compte tenu de l'incertitude des mesures. La PTB a prêté l'étalon SRP 19 au BIPM, et la stabilité des trois instruments qui se trouvent actuellement au BIPM est en cours d'évaluation afin de préparer l'étude pilote CCQM-P28 qui pourrait être suivie d'une comparaison clé. Dans le cadre de cette préparation, une autre étude est en cours ; elle vise à déterminer le niveau d'activité et les équipements des laboratoires nationaux en matière d'étalons primaires pour les mesures d'ozone.

Un dispositif pour le titrage en phase gazeuse, servant de méthode alternative pour la détermination de la concentration d'ozone, est en cours de mise au point. Nous mettons aussi en place un système primaire pour la préparation dynamique d'étalons de gaz de dioxyde d'azote, et une balance à suspension magnétique servant à mesurer les pertes de masse au niveau des tubes de perméation a été installée. Sa stabilité est en cours d'évaluation. Un système pour la comparaison des étalons de monoxyde d'azote est en cours de fabrication, et un système d'auto-échantillonnage y sera intégré vers la fin de 2002.

Informatique et qualité : Le nombre de consultations externes du site Web du BIPM ne cesse d'augmenter, avec environ 1350 connexions quotidiennes. Compte tenu de l'importance des informations en ligne, un système de secours a été installé. Dans le cadre du programme général d'évolution de nos prestations, de nouveaux services sont offerts aux utilisateurs internes et externes du site Web du BIPM. Suite à la décision du directeur du BIPM d'établir un système qualité, le travail d'élaboration de la documentation initiale a débuté. Les premières procédures et les premiers formulaires ont été publiés.

Base de données du BIPM sur les comparaisons clés : La base de données du BIPM sur les comparaisons clés est totalement opérationnelle. Environ 450 comparaisons clés et supplémentaires effectuées sous les auspices des Comités consultatifs et des organisations régionales de métrologie sont enregistrées dans son annexe B ; des résultats y sont présentés pour trente-six d'entre elles. Les résultats sont maintenant publiés dans l'annexe B à raison d'environ deux nouveaux résultats par mois. L'annexe C contient environ treize mille données sur les aptitudes des laboratoires nationaux de métrologie en matière de mesures et d'étalonnages, dans presque tous les domaines de la métrologie. En plus de la publication des résultats, nous avons consacré beaucoup d'efforts à l'amélioration de la structure des diverses bases de données sous-jacentes et à la programmation pour le Web. Le site Web de la base de données du BIPM sur les comparaisons clés reçoit environ 2500 visites par mois.

Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM (JCRB) : Le JCRB se réunit deux fois par an ; c'est un forum de discussion sur les questions liées à la mise en œuvre de l'Arrangement de reconnaissance mutuelle, où les décisions sont prises. Un site Web interactif a été mis en place par le BIPM à l'intention des représentants des organisations régionales de métrologie au JCRB, qui l'utilisent pour gérer l'examen des CMCs soumis par les laboratoires nationaux de métrologie participant au MRA. Mme Angela Samuel a été mise provisoirement par le NML-CSIRO à la disposition du BIPM pour servir de secrétaire exécutive au JCRB.

1.2 Publications, conférences et voyages du directeur

1.2.1 Publications extérieures

1. Quinn T.J., The International System of Units (SI), the last ten years, *International School of Physics "Enrico Fermi", Course CXLVI, Recent Advances in Metrology and Fundamental Constants* (S. Leschiutta, T.J. Quinn et P. Tavella eds.), IOS Press, 2001, 3-10.
2. Quinn T.J., The organization of metrology, *ibid.*, 11-25.
3. Quinn T.J., Metrology and society, *ibid.*, 73-81.
4. Quinn T.J., Globalization of Metrology, the Contribution of a Major NMI, *Proc. NPL Centenary Meeting November 2000*, NPL, 2002, 64-67.
5. Quinn T.J., News from the BIPM, *Metrologia*, 2002, **39**, 115-119.

1.2.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

T.J. Quinn s'est rendu à :

- Ottawa (Canada), les 5 et 6 septembre 2001, pour une réunion du conseil de l'Institut des étalons nationaux de mesure du NRC ;
- Tsukuba (Japon), du 6 au 9 novembre 2001, pour l'assemblée générale de l'APMP ;
- Londres (Royaume-Uni), le 25 janvier 2002, pour une visite du National Institute for Biological Standards and Control ;
- Londres (Royaume-Uni), le 14 février et le 28 juin 2002, pour des réunions du Paul Instrument Fund ;
- Turin (Italie), les 18 et 19 février 2002, pour une réunion du conseil scientifique de l'IMGC ;
- Pretoria (Afrique du Sud), du 3 au 6 mars 2002, pour une réunion du Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM (JCRB) ;
- Braunschweig (Allemagne), les 25 et 26 avril 2002, pour un examen des travaux de la PTB ;
- Paris (France), le 14 mai 2002, pour un exposé à l'ENS sur la mesure de G ;
- Bratislava (Slovaquie), les 15 et 16 mai 2002, pour la réunion du comité de l'EUROMET ;

- Pise (Italie), le 27 mai 2002, pour un exposé sur la mesure de G au Symposium on gravitational physics organisé par l'université de Pise ;
- Ottawa (Canada), du 16 au 22 juin 2002, pour assister à la CPEM et pour une réunion du bureau du CIPM.

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 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'Union internationale de chimie pure et appliquée (UICPA). Il est président du Paul Instrument Fund de la Royal Society. Il est président du JCRB et du Comité commun pour les guides en métrologie (JCGM).

En mai 2002, il a été élu membre de la Royal Society, à Londres.

2 **LONGUEURS** (J.-M. CHARTIER*, puis A.J. WALLARD)

2.1 **Comparaisons et mesures absolues de fréquence** (L. Robertsson, L.S. Ma et S. Picard)

La situation relative à la métrologie des fréquences optiques et à la réalisation de la définition du mètre a changé considérablement avec l'introduction des générateurs de peignes pour les mesures absolues de fréquence optique. Ces techniques permettent de rattacher les fréquences optiques à des étalons primaires de fréquence tels que des horloges à césium par des mesures cohérentes de phase en une seule étape avec l'espoir d'un niveau d'exactitude élevée.

Les premières mesures avec le nouveau peigne du BIPM ont été faites en septembre 2001. Depuis, dans le cadre de notre programme général de comparaisons de lasers, nous avons mesuré la fréquence de trois des

* Jusqu'au 28 février 2002.

radiations recommandées avec dix systèmes lasers : lasers à Nd:YAG asservis sur l'iode à 532 nm ; lasers à He-Ne asservis sur l'iode à 543 nm ; et lasers à He-Ne asservis sur l'iode à 633 nm. Pour vérifier la cohérence des mesures, des mesures supplémentaires de différence de fréquence ont été effectuées entre les lasers, qu'ils aient été mesurés directement ou non.

La technologie des peignes a de toute évidence le potentiel d'améliorer la réalisation de la définition du mètre au niveau international. En réponse aux demandes des laboratoires nationaux de métrologie, un nouveau programme de comparaisons et de mesures absolues de fréquence de plusieurs types de lasers asservis est mis au point. À partir de maintenant, ce programme disséminera directement le niveau d'exactitude élevé fourni par les générateurs de peignes à un nombre bien plus élevé de systèmes lasers conservés par les laboratoires nationaux de métrologie que le précédent programme de comparaison du BIPM, fondé sur les battements de fréquences optiques, qui ne transférait que la fréquence délivrée par les lasers conservés au BIPM à 633 nm.

Nous avons aussi commencé à élaborer au BIPM un système à peigne transportable, afin d'effectuer un programme international de comparaisons de systèmes à peignes, visant à étudier les aptitudes de mesure et l'exactitude de ces systèmes de mesure absolue de fréquence.

2.2 Lasers asservis

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

Nous avons actuellement pour objectif de mesurer d'ici la fin de 2002 la fréquence absolue du laser acheté en 1998 à l'Institut Lebedev (BIPM1), au moyen de notre peigne à impulsions femtosecondes, en utilisant un nouveau dispositif qui permet d'accéder aux fréquences laser dans l'infrarouge. Cela aidera à valider les mesures classiques réalisées au moyen de chaînes de fréquence, d'établir les applications au domaine de l'infrarouge des mesures fondées sur des peignes, et d'améliorer la confiance dans les résultats des mesures de fréquence avec les systèmes à $3,39 \mu\text{m}$ conservés par les laboratoires nationaux de métrologie.

La construction et l'étude de tubes laser à He-Ne et de cuves à méthane se poursuit donc. Nous avons obtenu des résultats satisfaisants avec une première série de tubes laser et de cuves à méthane utilisant des fenêtres optiques soudées par adhésion moléculaire. En conséquence, une série de

nouveaux tubes laser et de cuves à méthane seront produits sous ultravide et remplis au moyen d'un nouveau four thermorégulé programmable. Ces éléments sont essentiels pour la conservation à long terme de nos systèmes.

Le laser « deux modes » dont la structure mécanique a été conçue et réalisée par l'atelier du BIPM est maintenant en service et il sera utilisé comme laser de référence pour le télescope à laser acheté l'année dernière à l'Institut Lebedev (Moscou, Féd. de Russie). Si nécessaire, ce système peut encore être amélioré d'après des plans optimisés au moyen de programmes conçus pour comparer la stabilité mécanique de différents types de télescopes.

Nous examinons actuellement l'avenir à long terme de ce programme à la lumière des progrès des peignes de fréquence, des projets des laboratoires nationaux de métrologie qui continuent à s'intéresser à la conservation des systèmes asservis sur le méthane, et des conseils du Groupe de travail du CCL sur la mise en pratique.

2.2.2 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)

Comme nous consultons actuellement les laboratoires nationaux de métrologie sur leur intérêt à long terme pour les lasers à diode asservis sur le rubidium à $\lambda \approx 778$ nm, le programme du BIPM de mise au point de systèmes transportables est en attente pour le moment. Cependant, des systèmes miniaturisés de positionnement ont été étudiés et fabriqués par l'atelier du BIPM, ainsi qu'un nouveau projet de cavité Perot-Fabry contenant la cuve à rubidium.

Nous avons aussi mis au point des programmes d'optimisation utiles au développement de la nouvelle cavité Perot-Fabry, de manière à améliorer sa stabilité mécanique. De plus, le système à ultravide conçu pour le remplissage des cuves à rubidium a été rénové.

2.2.3 Lasers à He-Ne asservis sur l'iode à $\lambda \approx 633$ nm (J.-M. Chartier* et L. Robertsson ; A. Chartier** et J. Labot)

En janvier 2001, le BIPM a effectué une comparaison de lasers du NPL dans la partie rouge du spectre. Depuis le départ à la retraite de M. Chartier, les

* M. J.-M. Chartier a pris sa retraite le 28 février 2002.

** Mme A. Chartier a pris sa retraite le 28 février 2002.

systèmes du BIPM sont conservés pour répondre aux demandes de comparaisons de fréquence, mais ces étalons de fréquence ne devraient pas faire l'objet de travaux de développement à l'avenir (*voir* section 2.1).

2.2.4 Lasers à He-Ne asservis sur l'iode à $\lambda \approx 543$ nm (J.-M. Chartier)

Entre le 28 janvier et le 8 février 2002, le BIPM a effectué une comparaison dans la partie verte du spectre de systèmes du CMI, du DFM, de l'IMGC, du NIM, et du BIPM. Depuis le départ à la retraite de M. Chartier, les systèmes asservis sur l'iode à 543 nm du BIPM ne sont plus conservés au BIPM. Cependant, des mesures absolues peuvent être faites au moyen de la technique du peigne optique, pour répondre aux demandes futures de mesures de cet étalon de fréquence émanant des laboratoires nationaux de métrologie (*voir* section 2.1).

2.2.5 Lasers à Nd:YAG asservis sur l'iode à $\lambda \approx 532$ nm

Ce type d'étalon de fréquence est particulièrement intéressant en raison de sa stabilité à court terme qui s'avère remarquable. Le BIPM continue donc à étudier et optimiser ces systèmes qui sont aussi conservés pour satisfaire aux demandes de comparaisons de fréquence des laboratoires nationaux de métrologie.

2.2.6 Lasers à Nd:YVO₄ asservis sur l'iode à $\lambda \approx 532$ nm pour la métrologie dimensionnelle (L.F. Vitouchkine)

Un laser à Nd:YVO₄ à l'état solide, pompé par diode, portable et compact, et à asservissement électronique sur l'iode à $\lambda \approx 532$ nm, a été mis au point en coopération avec l'ILP SOI (Féd. de Russie). Il a été vérifié au BIPM. On a obtenu une stabilité relative de fréquence de 3×10^{-13} pour un temps d'échantillonnage de 100 s. Ce laser est capable de répondre aux besoins fondamentaux du BIPM pour les mesures de métrologie dimensionnelle appliquées à la gravimétrie et pour l'interférométrie.

2.3 **Cuves à iode** (J.-M. Chartier, S. Picard et L. Robertsson ; A. Chartier, J. Labot et D. Boulghobra*)

L'année passée a été marquée par une intense activité de remplissage de cuves : vingt-huit cuves de tailles différentes ont été remplies. La fréquence d'absorption de treize de ces cuves a aussi été vérifiée, dont huit par fluorescence.

Le remplissage et la fourniture de cuves de haute qualité par le BIPM se poursuivent. Pour améliorer le contrôle de la qualité des cuves, un dispositif expérimental a été spécialement conçu et construit afin de vérifier les cuves longues ainsi que celles équipées de fenêtres parallèles et utilisées à la longueur d'onde de 532 nm ; nous avons commencé à étudier les cuves au moyen de cet équipement.

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

La deuxième partie du logiciel INTERFBEAM servant à calculer la figure d'interférences obtenue avec un interféromètre à deux faisceaux a été mise au point à l'ILP SOI (Féd. de Russie) en coopération avec le BIPM. Ce logiciel peut être utilisé pour un interféromètre laser à réflecteurs coniques, en prenant en compte les défauts éventuels d'alignement des composants optiques et les tolérances pour la fabrication des réflecteurs.

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

La sixième comparaison internationale de gravimètres absolus, ICAG 2001, a eu lieu au BIPM de juin à août 2001 et (pour le groupe de l'IMGC) du 27 septembre au 2 octobre 2001. Dix-sept gravimètres absolus appartenant à douze pays et au BIPM ont servi à effectuer des mesures sur cinq sites du micro-réseau gravimétrique. Dix-sept gravimètres relatifs appartenant à huit pays ont servi à mesurer les gradients gravimétriques verticaux et la liaison entre les sites. Comme cela avait été fait lors de la comparaison ICAG 1994, lors de laquelle quelques gravimètres absolus avaient aussi mesuré certaines liaisons, toutes les liaisons ont été mesurées avec des gravimètres absolus lors de la comparaison ICAG 2001. Il a donc été possible pour la première fois d'ajuster non seulement les mesures relatives mais aussi absolues, et

* Étudiante effectuant un stage de quatre mois.

ensuite d'ajuster à la fois les valeurs absolues et relatives de g aux différents sites du micro-réseau gravimétrique.

Deux types différents d'équations ont été utilisés pour corriger les mesures relatives pendant les observations : le premier était fondé sur la lecture des valeurs des gravimètres relatifs, et le second sur les différences entre ces valeurs. Cette approche a été mise au point à l'origine pour ajuster le réseau gravimétrique chinois selon le système 1985 et elle utilise le logiciel « adjG » modifié et adapté au réseau gravimétrique d'ICAG 2001.

Les résultats finaux des mesures de l'accélération en chute libre lors d'ICAG 2001, à une hauteur de 0,90 m aux sites A et B, sont respectivement de $980\,925\,701,2 (5,5) \mu\text{Gal}$ et de $980\,928\,018,8 (5,5) \mu\text{Gal}$, les incertitudes entre parenthèses correspondent aux moyennes pondérées des résidus de l'ajustement combiné des valeurs absolues et relatives.

2.6 Publications, conférences et voyages : section des longueurs

2.6.1 Publications extérieures

1. Chartier J.-M., Vitushkin L., Khaleev M., Novikov G., Orlov O., Terekhov S., Ustyugov V., A Portable I_2 -stabilized Nd:YVO₄/KTP Laser for Secondary Wavelength Standards at 532 nm, *Proc. SPIE*, 2001, **4401**, 263-266.
2. Diddams S.A., Hollberg L., Ma L.-S., Robertsson L., Femtosecond laser-based optical clockwork with instability $\leq 6.3 \times 10^{-16}$ in 1 s, *Opt. Letters*, 2002, **27**, 58-60.
3. Diddams S.A., Udem Th., Vogel K.R., Ma L.-S., Robertsson L., Oates C.W., Curtis E.A., Itano W.M., Drullinger R.E., Wineland D.J., Berquist J.C., Hollberg L., A femtosecond-laser-based optical clock, *Proc. 6th Symp. Freq. Stand. Metrol.* (St Andrews, Scotland), 2001, 419-426.
4. Hasche K., Herrmann K., Mirandé W., Seemann R., Vitushkin L., Xu M., Yu G., Calibrated scanning force microscope with capabilities in the subnanometre range, *Surf. Interface Anal.*, 2002, **33**, 71-74.
5. Robertsson L., Picard S., Hong F.-L., Millerioux Y., Juncar P., Ma L.-S., International comparison of $^{127}\text{I}_2$ -stabilized frequency-doubled Nd:YAG lasers between the BIPM, the NRLM and the BNM-INM, October 2000, *Metrologia*, 2001, **38**, 567-572.

6. Matus M., Balling P., Šmid M., Walczuk J., Bánréti E., Tomanyiczka K., Popescu GH., Chartier A., Chartier J.-M., International comparisons of He-Ne lasers stabilized with $^{127}\text{I}_2$ at $\lambda = 633$ nm (September 1999). Part IX: Comparison of BEV (Austria), CMI (Czech Republic), GUM (Poland), OMH (Hungary), NIPLPR (Romania) and BIPM lasers at $\lambda = 633$ nm, *Metrologia*, 2002, **39**, 83-89.

2.6.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

R. Felder s'est rendu :

- à la société Laserlabs, Étampes (France), le 7 août 2001 ;
- à Saint Andrews (Écosse), du 10 au 14 septembre 2001, au sixième Symposium on Frequency Standards and Metrology, pour des exposés intitulés « Absolute Frequency Measurements with a Set of Transportable He-Ne/CH₄ OFS and Prospects for Future Design and Applications », co-signé par M. Gubin, E. Kovalchuk, E. Petrukhin, A. Shelkovnikov, D. Tyurikov, R. Gamidov, Ch. Erdogan, E. Sahin, R. Felder R., P. Gill, S. Lea, G. Kramer et B. Lipphardt (voir aussi *Symposium Digest*, 2001) et « Optical Frequency Standard at 1.5 μm Based on Doppler-Free Acetylene Absorption », co-signé par A. Onae, K. Okumura, K. Sugiyama, F.-L. Hong, H. Matsumoto, K. Nakagawa, R. Felder et O. Acef (voir aussi *Symposium Digest*, 2001) ;
- à la société Fichou, Fresnes (France), le 12 novembre 2001 et le 19 mars 2002, pour des discussions techniques sur la réalisation pratique de tubes laser ;
- à l'université Paris Sud, Orsay (France), le 25 mars 2002, pour des discussions techniques sur la réalisation pratique de cavités de diodes laser ;
- au CNRS, Verrières-le-Buisson (France), le 6 juin 2002, pour des discussions techniques sur la réalisation pratique de transitions entre verres différents.

R. Felder a co-signé l'exposé « An Accurate Optical Frequency Measurement System in the Telecommunication Region », par A. Onae, K. Okumura, K. Sugiyama, F.-L. Hong, J. Ishikawa, H. Matsumoto, K. Nakagawa, R. Felder et O. Acef (voir *CPEM Digest 2002*, 568-569) à la CPEM 2002, Ottawa (Canada), qui a eu lieu du 17 au 21 juin 2002.

L.-S. Ma s'est rendu :

- à Beijing (Chine), les 1^{er} et 2 décembre 2001, invité pour un exposé intitulé « fs-laser comb and its application » au Symposium on Atomic Frequency Standards and Precision Laser Spectroscopy ;
- à l'université d'Innsbruck (Autriche), du 16 au 19 avril 2002, invité pour un exposé ;
- à Shanghai (Chine), du 13 au 31 mai 2002 ;
- à Beijing (Chine), les 13 et 14 mai 2002, invité pour un exposé à l'International Symposium on Molecular Spectroscopy and Chemical Dynamics intitulé « Optical frequency measurement, optical clock and optical pulse synthesis using femtosecond lasers » (L.-S. Ma *et al.*) ;
- à Beijing (Chine), le 20 mai 2002, invité pour un exposé intitulé « Precision control of optical field in time-frequency domain simultaneously » au Symposium on the Frontiers of Metrology Science ;
- au Laboratoire de physique des lasers, Villeneuve (France), le 28 juin 2002, invité pour un exposé intitulé « Optical Frequency Measurement, Optical Clocks and Optical Pulse Synthesis ».

L.-S. Ma et L. Robertsson se sont rendus :

- à Saint Andrews (Écosse), du 9 au 14 septembre 2001, pour le sixième Symposium on Frequency Standards and Metrology ;
- au BEV, Vienne (Autriche), le 15 avril 2002.

S. Picard et L.-S. Ma ont rendu visite à M. D. Rovera, BNM-LPTF (France), le 27 juillet 2001.

S. Picard, L.-S. Ma et L. Robertsson ont assisté à la CPEM 2002, Ottawa (Canada), du 16 au 21 juin 2002. Ils étaient co-auteurs des exposés intitulés « Results from international comparisons at the BIPM providing a worldwide reference network of $^{127}\text{I}_2$ – stabilized frequency-doubled Nd:YAG lasers » (voir *CPEM Digest 2002*, 212-213), par S. Picard, L. Robertsson, L.-S. Ma, Y. Millerieux, P. Juncar, J.-P. Wallerand, P. Balling, P. Křen, K. Nyholm, M. Merimaa, T.E. Ahola, F.-L. Hong et « The BIPM laser standards at 633 nm and 532 nm simultaneously linked to the SI second using a femtosecond laser in an optical clock configuration », par L.-S. Ma, L. Robertsson, S. Picard, J.-M. Chartier, H. Karlsson, E. Prieto, J.K. Ranka, et R.S. Windeler (voir *CPEM Digest 2002*, 426-427).

L. Robertsson s'est rendu :

- au Quantenoptik und Spektroskopie Institut für Experimentalphysik, université d'Innsbruck (Autriche), les 16 et 17 avril 2002 ;

- à l'Institute of Quantum Electronics, Swiss Federal Institute of Technology Zurich (Suisse), les 18 et 19 avril 2002.

L. Vitouchkine s'est rendu à :

- Budapest (Hongrie), du 4 au 9 septembre 2001, à la réunion scientifique de l'Association internationale de géodésie ;
- la PTB, Braunschweig (Allemagne), les 28 et 29 novembre 2001, pour le séminaire « Requirements and recent developments in high-precision length metrology » ;
- Saint-Pétersbourg (Féd. de Russie), du 24 au 31 mai 2002, pour des discussions dans le cadre de la collaboration sur la mise au point des lasers DPSS à l'ILP SOI et pour des discussions sur la mise au point d'un gravimètre absolu au VNIIM ;
- Moscou (Féd. de Russie), du 24 au 30 juin 2002, invité pour un exposé à la Conférence on Lasers, Applications and Technologies, et pour une présentation sur la gravimétrie absolue au Sternberg Astronomical Institute.

A.J. Wallard s'est rendu à :

- Varsovie (Pologne), les 17 et 18 juin 2002, pour la conférence « Towards an Integrated Infrastructure for Measurements » et un exposé lors de la session plénière sur « Providing Worldwide Confidence in Measurement Results » ;
- Ottawa (Canada), du 19 au 21 juin 2002, pour la CPEM et une réunion du bureau du CIPM ;
- Querétaro (Mexique), du 27 au 31 mai 2002, pour le Simposio de Metrologia et invité pour un exposé sur « The CIPM's MRA and some challenges for world metrology » ;
- Londres (Royaume-Uni), le 26 juin 2002, pour présider le Membership and Qualifications Board de l'Institute of Physics.

J. Labot s'est rendu aux Établissements Dumas, Tours (France), du 11 au 13 mars 2002.

2.7 Activités liées au travail des Comités consultatifs

Des membres de la section des longueurs ont participé au Comité consultatif des longueurs (CCL), du 18 au 20 septembre 2001 et au Groupe de travail du CCL sur la mise en pratique, le 18 septembre 2001.

A.J. Wallard est secrétaire exécutif du CCL.

2.8 Visiteurs de la section des longueurs

- M. F. Senotier (Laserlabs, France), les 11 juillet, 9 novembre, 3 et 4 décembre 2001.
- MM. T. Albeers et R. Ghianni (NMI), le 13 juillet 2001.
- M. P. Plombin (Éts. Dumas, Noizay, France), les 23 juillet, 27 septembre, 18 octobre, 16 novembre et 19 décembre 2001, et les 27 mars et 5 juin 2002.
- MM. J.-P. Wallerand, Louyer et Challemel du Rosier (BNM-INM), le 25 juillet 2001.
- M. A. Onae (NMIJ), les 17 et 18 septembre 2001.
- M. D. Rovera (BNM-LPTF), le 27 septembre 2001.
- M. V. Hachet (Pfeiffer, Buc, France), les 5 et 11 décembre 2001.
- M. M.-D. Plimmer (BNM-INM), le 17 janvier 2002.
- M. O.A. Orlov (ILP SOI), du 20 janvier au 11 avril 2002 pour participer aux essais du laser portable Nd:YVO₄/KTP/I₂ modifié à 532 nm et des nouveaux asservissements électroniques.
- MM. P. Balling et P. Kren (CMI), du 30 janvier au 6 février 2002.
- MM. C. Edwards et W.R.C. Rowley (NPL), les 30 et 31 janvier 2002.
- MM. Qian Jin, Shi Chun Ying et Liu Zho Yu (Chine), du 1^{er} au 8 février 2002.
- MM. P. Cordiale et M. Bisi (IMGC), du 4 au 7 février 2002.
- MM. J. Henningsen et J. Hald (DFM), du 4 au 8 février 2002.
- M. R. Blatt (Université d'Innsbruck, Autriche), le 20 février 2002.
- M. M. Winters (Winters Electro-Optics, Longmont CO, États-Unis), le 26 février 2002.
- M. N. Picqué (Université Paris Sud, Orsay, France), le 26 février 2002.
- Mlle D. Boulghobra (École nationale supérieure de physique de Strasbourg, France), du 11 mars au 26 juillet 2002.
- M. Wu Ling-An (Physics Institute of Sinica Academy, Chine), le 14 mars 2002.
- M. A.B. Smirnov (St Petersburg State Technical University, Saint-Pétersbourg, Féd. de Russie), le 19 mars 2002, pour discuter de la conception d'un gravimètre absolu.

- M. F. Dupont (BRGM), les 21 et 22 mars 2002, pour des mesures relatives de l'accélération en chute libre sur les sites du BIPM.
- Mmes H. Bras et K. Thiery (Équipements scientifiques, Garches, France), le 28 mars 2002.
- M. J.-P. Duarand (Laser 2000, Saint-Nom-la-Bretèche, France), le 12 avril 2002.
- M. Fang Zhanjun (NIM), le 22 avril 2002.
- M. E. Prieto (CEM), le 22 avril 2002.
- M. H. Karlsson (JV), du 22 au 26 avril 2002.
- M. M.-P. Sassi (IMGC), le 16 mai 2002.
- M. L. Pendrill (SP), le 22 mai 2002.
- M. et Mme Bernard (CNRS, Verrières-le-Buisson, France), le 24 mai 2002.
- MM. A. Yankovsky et E. Alexandrov (VNIIM, Saint-Pétersbourg), du 3 au 17 juin 2002, pour mesurer les caractéristiques de l'isolation contre les vibrations des sites du BIPM.
- M. S.G. Smolentsev (Institute for Applied Astronomy of Russian Academy of Sciences, Féd. de Russie), le 10 juin 2002.

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

3.1 Prototypes et étalons (R.S. Davis ; J. Coarasa et J. Hostache)

L'étalonnage des prototypes n° 48 (Danemark) et n° 24 (Espagne), en cours au moment du dernier rapport, a été terminé.

De plus, les prototypes suivants ont été étalonnés : n° 74 (Canada), n° 58 (Égypte), n° 35 (France) et n° 70 (Allemagne).

Un rapport sur les étalonnages les plus récents des prototypes et étalons de masse de 1 kg en platine iridié, appartenant au BIPM, promis dans le précédent rapport annuel, a été présenté au CCM en mai 2002. Dans le même document (CCM/2002-09, révisé) sont résumés les résultats des étalonnages

des prototypes mesurés au BIPM pendant les dix années écoulées depuis la troisième vérification périodique.

Des étalons de masse de 1 kg en acier inoxydable ont été étalonnés pour le SPRING Singapour (Singapour) et le CSIR (Afrique du Sud). Des étalonnages sont, en ce moment, en cours pour l'IRMM (Union européenne) et Enterprise Ireland (Irlande). De plus nous avons commencé à étudier la stabilité de huit cylindres de 1 kg en acier inoxydable qui seront utilisés comme étalons de transfert pour une future comparaison clé, CCM.M.K-4.

Un effort considérable a été fait pour améliorer les performances du conditionnement d'air du laboratoire d'étalonnage. Son bon fonctionnement a permis de réduire l'influence des petits changements de température dans la balance Metrotec, dont nous parlions l'année dernière. Nous avons prévu de recouvrir chaque étalon d'un couvercle de protection afin de vérifier que ces effets systématiques étaient dus à la convection de l'air. Nous avons fait ces essais et avons constaté que les couvercles de protection éliminent le problème. Leur utilisation est hélas très difficile dans les mesures courantes.

La balance Metrotec a été utilisée pour étalonner deux séries de sous-multiples du kilogramme, des pièces de 500 g à 100 g en platine iridié. Ces étalons ont la forme de sphères tronquées et, pour les étalonner dans cette balance, nous avons dû mettre en place une nouvelle technique. L'étalonnage d'étalons de masse de 100 g en platine iridié, directement rattachés aux prototypes du BIPM, est important pour soutenir l'expérience de la balance du watt actuellement en cours au METAS (Suisse).

3.2 Détermination de la masse volumique de l'air à l'aide de trois méthodes (H. Fang et A. Picard)

Le but de ce travail est de réduire l'incertitude sur la détermination de la masse volumique de l'air en comparant deux méthodes absolues (application de la formule du CIPM-1981/91 et mesure directe utilisant des artefacts) et une méthode relative (réfractométrique). Les mesures effectuées ont montré, à court terme, une bonne cohérence en sensibilité et en répétabilité pour chaque méthode. Un écart inférieur à $2,4 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$, fondé sur la différence de volume estimée entre les deux artefacts, a été obtenu l'année dernière entre les deux méthodes absolues.

Nos deux artefacts Cc et Cp ont été envoyés à la PTB (Braunschweig, Allemagne) en février 2001 pour l'étalonnage de leurs volumes. La différence de volume entre les deux artefacts obtenue par la PTB est

inférieure de $9,7 \text{ mm}^3$ à celle estimée l'année dernière. Cette nouvelle détermination engendre un écart de l'ordre de $10^{-4} \text{ kg m}^{-3}$ entre la méthode des artefacts et la formule du CIPM. L'incertitude-type relative composée sur la masse volumique de l'air déterminée par les artefacts est de 7×10^{-6} en tenant compte de l'incertitude sur les volumes des artefacts établie par la PTB (la masse volumique nominale de l'air dans un laboratoire au niveau de l'océan est de $1,2 \text{ kg m}^{-3}$).

Pour confirmer l'écart de $10^{-4} \text{ kg m}^{-3}$ et dans le cadre du projet masse 144 de l'EUROMET, nos artefacts ont été comparés simultanément à la PTB avec les leurs. Les résultats obtenus ont montré une différence de masse volumique de l'air par rapport à la formule du CIPM de $4,1 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$ pour les artefacts du BIPM et de $5,9 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$ pour ceux de la PTB. Les quatre artefacts ont ensuite été comparés au BIPM. Jusqu'à maintenant, nous avons obtenu respectivement pour nos artefacts et ceux de la PTB une différence de masse volumique de l'air de $9,5 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$ et $6,5 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$. L'incertitude relative sur la formule du CIPM est habituellement estimée à $6,5 \times 10^{-5}$, les différences observées ne sont donc pas étonnantes.

Les résultats obtenus au BIPM et à la PTB sont cohérents pour les artefacts de la PTB. Pour les artefacts du BIPM, nous observons une large dispersion qui peut être expliquée par l'instabilité de l'un des artefacts. En effet, nous avons constaté que l'un des artefacts du BIPM se comporte différemment dans l'air et sous vide par rapport aux trois autres.

L'ensemble des résultats obtenus montre que l'utilisation des artefacts pourrait en principe améliorer la détermination de la masse volumique de l'air d'un facteur dix si les artefacts sont bien contrôlés et suffisamment stables.

Il est nécessaire d'éclaircir la différence observée entre les deux méthodes. Nous notons que des expériences similaires ont aussi été réalisées dans quelques autres laboratoires. La tendance globale est que la formule du CIPM donne une masse volumique de l'air inférieure à celle mesurée par la méthode des artefacts. Nous notons que la formule du CIPM-1981/91 est fondée sur la composition de l'air établie au milieu du siècle dernier. Nous faisons appel au CCQM, lequel pourrait nous aider à vérifier la composition de l'air troposphérique, en particulier la teneur en argon dans l'air.

3.3 Balance hydrostatique (R.S. Davis et C. Goyon-Taillade)

Comme dans le rapport de l'année dernière, nous rappelons que le système comporte deux échangeurs de masses, l'échangeur supérieur étant toujours dans l'air ambiant. L'échangeur inférieur est habituellement immergé dans un bain hydrostatique thermostaté.

Le gradient vertical d'accélération de la pesanteur entre les deux échangeurs de masses est un paramètre requis pour corriger les résultats de pesées. Ce paramètre a été déterminé *in situ* d'abord en mesurant la différence de masse apparente de deux étalons, l'un placé sur l'échangeur supérieur et l'autre sur l'inférieur. Les deux échangeurs étaient dans l'air pour ces mesures. La position des deux étalons a été inversée et les mesures répétées. Les deux différences de masse obtenues par ce moyen sont corrigées de la poussée de l'air mais, néanmoins, diffèrent d'à peu près 400 µg parce que la différence d'altitude entre le plateau supérieur et inférieur de la balance est de 66 cm. Le gradient de pesanteur déduit de ces résultats de pesées est cohérent avec la valeur de la surveillance effectuée il y a quelques années dans une pièce voisine.

Nous rappelons que le dispositif pour traiter le fil de suspension afin de réduire les effets de la tension superficielle à l'interface air-eau est opérationnel et que la technique pour éliminer les bulles a été perfectionnée.

Les interrupteurs mécaniques de détection de position ont été remplacés par un système utilisant des capteurs optiques.

Actuellement, nous utilisons l'eau bidistillée comme étalon de masse volumique.

Les deux échangeurs de masses, l'un dans l'air et l'autre dans l'eau, peuvent chacun contenir quatre artefacts, ce qui permet, avec le même bain d'eau bidistillée, la détermination du volume de trois artefacts inconnus aussi bien que celui d'un étalon utilisé en contrôle. Ce dernier est un cylindre en acier inoxydable d'environ 1 kg, dont le but est de contrôler la reproductibilité du dispositif. Nous avons obtenu un écart-type relatif à long terme de $2,4 \times 10^{-6}$ pour le volume de l'étalon de contrôle avec sept différents échantillons d'eau. Pour les quatre derniers échantillons d'eau, il n'y a pas de différence significative entre l'écart-type relatif à long terme et à court terme qui est de 4×10^{-7} . Nous avons effectué des tests supplémentaires avec des artefacts en acier inoxydable et en platine iridié.

Maintenant que l'appareil a été entièrement caractérisé, il est utilisé pour son usage prévu, c'est-à-dire l'étalonnage du volume des nouveaux étalons fabriqués.

Le travail continue pour améliorer la fiabilité du système de déplacement.

3.4 Adsorption de vapeur d'eau sur des masses étalons par la méthode ellipsométrique (H. Fang et A. Picard)

L'objectif de ce travail est d'étudier la contamination de la surface de masses étalons par la méthode ellipsométrique. Cette méthode mesure le changement d'une surface échantillon en déterminant la variation de l'état de polarisation de la lumière réfléchiée par la surface.

Notre instrument a été renvoyé chez le fabricant (en Nouvelle-Zélande) en août 2001 pour réparer des défaillances électroniques et mécaniques. L'ajustement et l'étalonnage de l'instrument ont ensuite été effectués. Néanmoins, nous avons observé un bruit sur les signaux de sortie cent fois plus important que celui attendu. Dans le cas d'un échantillon en platine iridié, ce bruit correspond à environ une monocouche d'eau. Nous avons provisoirement réduit le bruit en ajoutant un filtre passe bas à la sortie de l'un des signaux. Le fabricant est venu au BIPM pour résoudre ces problèmes vers la mi-juin 2002.

L'effet de l'adsorption de vapeur d'eau a été étudié sur des échantillons en platine iridié et en silicium grâce aux mesures effectuées sous air contrôlé. L'humidité relative de l'air a été modifiée alternativement entre 8 % et 95 %. Les relations entre l'épaisseur de la couche d'eau absorbée et les signaux ellipsométriques sont estimés à l'aide de mesures supplémentaires sous vide.

Nous avons obtenu pour l'échantillon de platine iridié et de silicium le même type de courbe d'adsorption-désorption. Elle représente la variation de l'épaisseur de la couche d'eau en fonction de l'humidité relative de l'air. Nous avons observé une courbe en forme de S où la pente devient raide pour les valeurs hautes et basses de l'humidité relative et elle est moins importante dans la région intermédiaire. Une légère hystéresis a été observée entre la courbe d'adsorption et celle de désorption et une bonne répétabilité des mesures a été obtenue.

L'effet de l'adsorption en fonction de l'humidité relative était moins important sur l'échantillon de silicium que sur celui de platine iridié. Pour une variation de l'humidité comprise entre 30 % et 70 %, l'adsorption de la vapeur d'eau correspond à une demi-couche d'eau sur la surface de platine et

elle est quatre fois moindre sur le silicium. Ces résultats sont bien corrélés avec les variations de masse observées en fonction de l'humidité relative de l'air. Ce travail va continuer et les résultats vont être comparés avec ceux obtenus par la mesure directe des masses. Nous envisageons par la suite d'étendre l'étude aux effets de la contamination carbonée d'une surface.

3.5 Balance de torsion pour la mesure de G

(H.V. Parks, A. Picard, T.J. Quinn et C.C. Speake*)

Nous avons débuté l'étape suivante du programme de mesure de la constante gravitationnelle newtonienne G au moyen d'une balance de torsion. En 2001, nous avons mentionné une valeur de G accompagnée d'une incertitude-type relative composée de 5×10^{-5} . Ce résultat n'est toutefois pas cohérent avec les deuxièmes mesures de haute précision effectuées à l'université de Washington (États-Unis). Nous améliorons maintenant la balance pour réduire l'incertitude sur G d'un facteur cinq supplémentaire. Cela nous aidera à mieux comprendre un certain nombre d'effets systématiques éventuels. Nous avons déjà montré que nous pouvons réduire le bruit sur les signaux de sortie presque d'un facteur dix en ajoutant des cardans à amortissement magnétique et un filtre numérique passe bas pour minimiser l'influence des modes non désirés de la balance de torsion. Nous devons cependant aussi réduire d'autres sources d'incertitude systématique, comme nos mesures d'angles et de position. Nous travaillons avec une machine à mesurer les coordonnées améliorée et nous recherchons un autocollimateur plus exact. En collaboration avec nos collègues du VNIIM, nous étudions les conséquences des imperfections des optiques à multiplication utilisées pour augmenter le signal angulaire.

Une des plus importantes sources restantes de bruit du système provient des variations de température. Nous travaillons à placer la balance de torsion dans une enceinte isotherme. La balance proprement dite sera ainsi moins sensible aux variations de température. Par exemple, la géométrie de la capacité utilisée pour l'asservissement sera stabilisée en fixant des électrodes sur une plaque en zérodur.

Nous pensons que ces changements permettront une amélioration d'un facteur cinq au cours des deux prochaines années.

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

3.6 Pression (A. Picard)

Des étalonnages de jauges de pression par rapport au manobaromètre du BIPM ont été effectués tous les trois mois, pour les services internes du BIPM.

3.7 Susceptomètre magnétique du BIPM (R.S. Davis)

Le long travail de mise au point du susceptomètre magnétique du BIPM utilisé pour vérifier les propriétés magnétiques des étalons de masse et les composants de la balance est terminé. Les accessoires de la balance et le logiciel couramment utilisés au BIPM ont été fournis en kit à un certain nombre de laboratoires nationaux de métrologie. Quatre kits ont été envoyés cette année.

3.8 Publications, conférences et voyages : section des masses

3.8.1 Publications extérieures

1. Quinn T.J., Speake C.C., Richman, S.J., Davis R.S., Picard A., A new determination of G using two methods, *Phys. Rev. Letters*, 2001, **87**, 111101-1-4.
2. Quinn T.J., The Newtonian constant of gravitation, G , *International School of Physics "Enrico Fermi", Course CXLVI, Recent Advances in Metrology and Fundamental Constants* (S. Leschiutta, T.J. Quinn and P. Tavella eds.), IOS Press, 2001, 147-155.
3. Chung J.W., Ryu K.S., Davis R.S., Uncertainty analysis of the BIPM susceptometer, *Metrologia*, 2001, **38**, 535-541.
4. Fang H., Picard A., Juncar P., A heterodyne refractometer for air index of refraction and air density measurements, *Rev. Sci. Instrum.*, 2002, **73**, 1934-1938.
5. Picard A., Fang H., Three methods to determine the density of moist air during mass comparisons, *Metrologia*, 2002, **39**, 31-40.

3.8.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

R.S. Davis s'est rendu :

- au KRISS, Daejeon (Rép. de Corée), du 3 au 7 septembre 2001, pour participer à l'examen par les pairs des services de mesure du KRISS dans le domaine des masses et des grandeurs apparentées ;
- au SMU, Bratislava (Slovaquie), du 18 au 22 février 2002, pour assister à la réunion des personnes chargées des relations dans le domaine des masses de l'EUROMET (accompagné d'A. Picard) ;
- à l'université de Birmingham (Royaume-Uni), le 10 avril 2002, pour participer à la soutenance de thèse d'un candidat au doctorat en physique.

A. Picard s'est rendu :

- au 10^e Congrès international de métrologie, Saint-Louis (France), du 20 au 25 octobre 2001, pour un exposé intitulé « Three methods to determine the density of moist air during mass comparisons » ;
- au NMIJ, Tsukuba (Japon), les 1^{er} et 2 novembre 2001, pour assister à la réunion du Groupe de travail du CCM sur la constante d'Avogadro ;
- au BNM/INM-CNAM, Paris (France), le 9 septembre 2001, pour placer des marques d'identification sur de nouveaux étalons de masse (accompagné de H. Fang) ;
- à la PTB, Braunschweig (Allemagne), les 10 et 11 décembre 2001, pour transporter huit étalons de masse (deux paires d'artefacts spécialement conçus pour mesurer la poussée de l'air et quatre étalons de masse en acier inoxydable) et discuter avec M. Gläser au sujet d'une collaboration sur la détermination de la masse volumique de l'air (accompagné de H. Fang) ;
- à l'université technique d'Ilmenau (Allemagne), le 10 juin 2002, pour une assistance technique au sujet de la collaboration avec la société Sartorius (accompagné de R.S. Davis) ;
- à la CPEM 2002, Ottawa (Canada), du 16 au 23 juin 2002, pour présenter un poster sur « Methods to determine the density of moist air » et assister à des réunions connexes du Groupe de travail du CCM sur la constante d'Avogadro, du Groupe de travail du CCEM sur l'utilisation de mesures électriques pour contrôler la stabilité du prototype international du kilogramme, et à la réunion technique sur la balance du watt (accompagné de H. Fang).

H. Fang s'est rendue au 10^e Congrès international de métrologie, Saint-Louis (France), du 20 au 25 octobre 2001, pour un exposé sur « A heterodyne refractometer for air index and air density measurements ».

H.V. Parks s'est rendu :

- au JILA, Boulder (États-Unis), du 1^{er} au 14 juin 2002, pour aider M. J. Faller dans ses mesures de la constante newtonienne gravitationnelle ;
- à la CPEM 2002, Ottawa (Canada), du 16 au 23 juin 2002, pour présenter un poster sur « An improved BIPM torsion-strip balance for determining G ».

3.9 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.

A. Picard maintient un site Web, créé en septembre 2001 au BIPM, pour faciliter les activités du Groupe de travail du CCM sur la constante d'Avogadro.

3.10 Visiteurs de la section des masses

- MM. G. Genevès (BNM-LCIE), P. Pinot et M. Lecollinet (BNM-INM/CNAM), le 18 juillet 2001.
- MM. T. Fehling, D. Heydenbluth et M. Geyer (Sartorius), le 25 juillet 2001.
- MM. J. Verbeek et I. van Andel (NMI VSL), le 6 novembre 2001.
- M. C.C. Speake (Université de Birmingham), du 23 au 26 septembre 2001.
- MM. G. Hammond, C. Trenkel et A. Pulido (Université de Birmingham, Royaume-Uni), le 5 avril 2002.
- M. F. Hendrickx, Mme B. Dyckmans, MM. R. Eykens et M. Bickel (IRMM), le 9 avril 2002.
- M. D. Beaglehole (Beaglehole Instruments), les 13 et 14 juin 2002.

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. Konaté, P. Moussay et M. Thomas)

Les échelles de temps de référence TAI et UTC ont été régulièrement établies à partir des données fournies au BIPM par les laboratoires horaires qui maintiennent des réalisations locales de l'UTC, et publiées chaque mois dans la *Circulaire T*. Les résultats définitifs de l'année 2001 sont disponibles sous la forme des volumes imprimés du *Rapport annuel de la section du temps du BIPM (2001)*, volume 14, et sous la forme de fichiers informatiques accessibles par le réseau Internet sur le site du BIPM.

4.2 Algorithmes pour les échelles de temps

(J. Azoubib, G. Petit et P. Wolf)

L'algorithme utilisé pour le calcul des échelles de temps est un processus itératif qui produit tout d'abord l'échelle atomique libre (EAL) dont le TAI est dérivé. Le travail de recherche sur les algorithmes utilisés pour établir les échelles de temps effectué à la section du temps a pour but d'améliorer la stabilité à long terme de l'EAL et l'exactitude du TAI. Des études sont entreprises pour évaluer la possibilité d'offrir des prédictions de l'UTC et du 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. Depuis janvier 2001, le poids relatif maximal des horloges est fixé 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 trois 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.

Les études sur les algorithmes utilisés pour le calcul du TAI se poursuivent. Un estimateur du niveau de fiabilité atteint en assignant une valeur donnée à

la limite supérieure du poids des horloges a été proposé. Il a été montré qu'il est possible d'optimiser cet estimateur, et donc de définir un schéma de pondération optimal. Des tests effectués avec des valeurs simulées et réelles ont montré que cette méthode d'optimisation peut être utilisée pour le calcul du TAI.

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 2002.

4.2.2 Exactitude du TAI

L'exactitude du TAI est caractérisée par l'estimation de la différence relative, et de son incertitude, entre la durée de l'intervalle d'échelle de temps du TAI et la seconde du SI telle qu'elle est produite, sur le géoïde en rotation, par les étalons primaires de fréquence. Depuis août 2001, six 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 résultats détaillés d'une comparaison bilatérale avec le TAI ; il en a résulté un rapport rédigé conjointement par la PTB et le BIPM, maintenant publié. De tels rapports détaillés figurent dans le *Rapport annuel de la section du temps du BIPM*.

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 2001, de $+0,6 \times 10^{-14}$ à $+1,0 \times 10^{-14}$, avec une incertitude-type de $0,2 \times 10^{-14}$. La procédure actuelle de pilotage du TAI, visant à améliorer son exactitude sans altérer sa stabilité, ne semblant pas suffisante pour réduire cette différence, nous avons entrepris de nouvelles études sur ce sujet.

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

La section du temps du BIPM organise le réseau international de liaisons horaires. La configuration actuelle repose principalement sur la méthode classique des observations simultanées des satellites du GPS utilisant des récepteurs à un seul canal et des mesures du code C/A, qui 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. Une expérience pilote a débuté, visant à évaluer l'application aux liaisons horaires du TAI de mesures du code P porté par les deux fréquences émises par les récepteurs géodésiques du GPS. De plus, la section du temps du BIPM continue à étudier les autres méthodes de comparaison de temps et de fréquence, comme par exemple celles utilisant les mesures de phase. Le BIPM a fait l'acquisition de deux masers à hydrogène actifs, qui ont été installés au laboratoire de la section du temps en décembre 2001 ; utilisés pour des expériences de transfert de fréquence, ils donnent aussi la fréquence de référence pour la section des longueurs.

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, et des 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. Pour mémoire, nous vous rappelons qu'en juin 1997 nous avons débuté une série d'étalonnages différentiels de récepteurs du GPS en fonctionnement dans les laboratoires de temps européens et américains 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.

iii) Normalisation des récepteurs du GPS et du GLONASS

Le personnel de la section du temps du BIPM continue à participer 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

Six liaisons horaires utilisant des récepteurs du GPS à canaux multiples sont utilisées pour le calcul du TAI. L'introduction dans le calcul du TAI de liaisons réalisées à l'aide de récepteurs communs du GPS et du GLONASS à canaux multiples est aussi à l'étude.

v) Corrections ionosphériques estimées par l'IGS

Les paramètres ionosphériques estimés par l'IGS sont maintenant couramment utilisés pour corriger les retards ionosphériques pour le calcul du TAI dans tous les liaisons réalisées à l'aide de récepteurs du GPS. Une étude est en cours sur les corrélations éventuelles entre les paramètres ionosphériques et les variations apparentes des retards des récepteurs double-fréquence.

4.3.2 Mesures de phase et de code des récepteurs géodésiques

Nous vous rappelons que 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. 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 le récepteur du GPS Ashtech Z12-T et sur le récepteur du GLONASS Javad Legacy en service au BIPM se poursuivent. La méthode mise au point pour effectuer l'étalonnage absolu des retards du récepteur Z12-T nous permet d'utiliser ce récepteur pour des étalonnages relatifs de récepteurs similaires. 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 encore en cours de comparaison. Le

récepteur du GPS et du GLONASS JPS Legacy, acheté en l'an 2000, sert aussi de référence et est comparé au BIPM avec le récepteur Z12-T. Un rapport résumant les résultats déjà obtenus de l'étalonnage du récepteur Z12-T du BIPM a été préparé. Les campagnes d'étalonnages différentiels de tous les récepteurs similaires en fonctionnement dans des laboratoires de temps du monde entier, qui ont débuté en janvier 2001, se poursuivent. En juin 2002, douze étalonnages de ce type ont été effectués 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. Un des objectifs de cette étude est d'utiliser les résultats des récepteurs géodésiques pour les liaisons horaires du TAI ; une expérience pilote a débuté à cette fin. Des procédures et un logiciel ont donc été mis au point en collaboration avec l'ORB.

Un des récepteurs 3S Navigation fonctionnant au BIPM est utilisé pour la collecte automatisée des données de l'International GLONASS Service Pilot Project (IGLOS-PP), sous les auspices de l'IGS, projet auquel le BIPM participe. Comme nous l'avons dit précédemment, le but de ce projet 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 2001. Le BIPM effectue la collecte des résultats de comparaisons d'horloges par aller et retour de sept stations en activité et traite certaines liaisons. Neuf liaisons par aller et retour ont été introduites dans le calcul du TAI, et quatre 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 de ce type.

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 (BIPM2001). Nous continuons à collaborer avec l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP), à Toulouse, pour terminer le traitement d'un programme restreint d'observations effectuées au cours de ces dernières années.

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

L'uniformité dans la définition des systèmes de référence spatiaux prend de plus en plus d'importance pour la métrologie fondamentale, en particulier pour les techniques astronomiques de géodésie qui contribuent au Service international de la rotation terrestre (IERS). Depuis le 1^{er} janvier 2001, le BIPM est responsable, conjointement avec l'U.S. Naval Observatory (USNO), du Conventions Product Center de l'IERS. Le travail de rédaction d'une nouvelle édition de l'IERS Conventions, un document de 150 pages résumant les modèles, constantes et procédures destiné à l'analyse des données de l'IERS et à la communauté des astronomes et des géodésiens en général, progresse.

Le Comité mixte BIPM/UAI sur les systèmes de référence spatio-temporels et la métrologie dans le cadre de la relativité générale (JCR) a cessé ses activités en 2001, mais le travail se poursuit pour promouvoir la diffusion des recommandations de l'UAI adoptées en 2000.

Des activités liées à la réalisation des systèmes de référence en astronomie et en géodésie sont entreprises par Mme E.F. Arias en collaboration avec l'IERS et l'Observatoire de La Plata (Argentine).

4.6 Autres études (P. Wolf)

En collaboration avec le BNM-LPTF/OP (SYRTE, Observatoire de Paris), des études sont en cours 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 2005. Ces horloges devraient pouvoir atteindre une incertitude relative de l'ordre de 10^{-16} , ce qui représente une amélioration très importante pour l'exactitude du TAI et les expériences de physique fondamentale.

Un autre projet concerne des études de physique fondamentale (invariance de Lorentz) et des comparaisons des fréquences d'un maser à hydrogène et d'un oscillateur hyperfréquence cryogénique à saphir, en collaboration avec l'Observatoire de Paris et l'University of Western Australia. L'expérience (acquisition de données) est en cours au BNM-LPTF et un scientifique de la section du temps du BIPM participe à l'évaluation et à l'analyse des résultats. Les activités dans le domaine de l'interférométrie atomique se poursuivent, en particulier les études sur la quantification des degrés de liberté externes (recoil atomique) pour la fréquence et le contraste de frange des étalons primaires de fréquence.

4.7 Publications, conférences et voyages : section du temps

4.7.1 Publications extérieures

1. Defraigne P., Petit G., Bruyninx C., Use of geodetic receivers for TAI, *Proc. 33rd PTTI*, 2002, 341-348.
2. Heindorff T., Bauch A., Hetzel P., Petit G., Weyers S., PTB primary clocks: Performance and comparison with TAI in 2000, *Metrologia*, 2001, **38**, 497-501.
3. Lewandowski W., Azoubib J., Matsakis D., Recent Progress in International Time Transfer, *Proc. Beacon Symp. Space Weather Workshop*, 2001, 258-261.
4. Petit G., Jiang Z., Moussay P., White J., Powers E., Dudle G., Uhrich P., Progresses in the calibration of « geodetic like » GPS receivers for accurate time comparisons, *Proc. 15th EFTF*, 2001, 164-166.
5. Salomon C., Wolf P. *et al.*, Cold Atoms in Space and Atomic Clocks: ACES, *C.R. Acad. Sci. Paris*, **2**, Série IV, 2001, 1313-1330.
6. Souchay J, Arias E.F., Chapront J., Essaïfi N., Feissel M., Gontier A.-M., Celestial System Section of the Central Bureau, *IERS Annual Report for 2000*, Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2001, 26–52.
7. White J., Beard R., Landis G., Petit G., Powers E., Dual frequency absolute calibration of a geodetic GPS receiver for time transfer, *Proc. 15th EFTF*, 2001, 167-169.
8. Laurent P., Wolf P. *et al.*, Cold Atom Clocks in Space: PHARAO and ACES, *Proc. 6th Symp. Freq. Stand. Metrol.* (Gill P. ed.), World Scientific, 2002, 241-252.

9. Wolf P., Bize S., Bordé C.J., Clairon A., Landragin A., Laurent P., Lemonde P., Recoil effects in microwave atomic frequency standards: an update, *ibid.* 593-596.
10. Wolf P., Relativity and Metrology, *Proc. Int. School of Phys. "Enrico Fermi" Course CXLVI Recent Advances in Metrology and Fundamental Constants* (Quinn T.J., Leschiutta S. and Tavella P. eds.), IOS Press, 2001, 575-598.
11. Wolf P., Relativity with clocks in space, *ibid.*, 599-608.

4.7.2 Publications du BIPM

12. *Rapport annuel de la section du temps du BIPM (2001)*, 2002, **14**, 102 p.
13. *Circulaire T* (mensuelle), 6 p.
14. Azoubib J., Lewandowski W., *BIPM TWSTFT Reports*, 21 p.
15. Lewandowski W., Moussay P., Determination of the Differential Time Corrections Between GPS Time Equipment Located at the OP, IEN, ROA, PTB, NIST and USNO, *Rapport BIPM-2002/02*, 2002, 28 p.

4.7.3 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

E.F. Arias s'est rendue à :

- San Juan (Argentine), du 12 au 15 septembre 2001, pour des exposés à la 1^{re} réunion Dynamical Astronomy in Latin America (ADELA), intitulés « Definition and realization of the conventional time scales », « The future of the Coordinated Universal Time UTC » et « The problem of referencing on Earth and in space » ;
- Prague (Rép. tchèque), du 29 octobre au 2 novembre 2001, pour une visite et un examen par les pairs de l'Institute of Radio Engineering and Electronics, et une visite de l'Astronomical Institute of Prague ;
- Long Beach (Californie, États-Unis), du 26 au 29 novembre 2001, pour la 33^e réunion du PTTI, pour la réunion des stations participant au Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite, et pour la réunion du Special Rapporteur Group on the future of UTC ;
- Vienne (Autriche), le 27 février 2002, pour la 3^e réunion de l'Action Team on GNSS de COPUOS ;

- Sèvres (France), du 18 au 21 mars 2002, pour un exposé au 4^e Time Scales Algorithms Symposium, intitulé « Opening remarks to the IV Time Scales Algorithms Symposium », pour la réunion du Special Rapporteur Group on the future of UTC, et pour la réunion des stations participant au Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite (avec J. Azoubib) ;
- Paris (France), les 18 et 19 avril 2002, pour l'atelier de l'IERS sur la mise en pratique des nouvelles résolutions de l'UAI ;
- La Plata (Argentine), du 24 avril au 28 mai 2002, pour des cours aux étudiants à l'Observatoire astronomique de La Plata et pour une visite de l'ONBA ;
- Vienne (Autriche), le 4 juin 2002, pour la 3^e réunion de l'Action Team on GNSS de COPUOS.

J. Azoubib s'est rendu à :

- Long Beach (Californie, États-Unis), du 26 au 29 novembre 2001, pour la réunion des stations participant au Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite, pour la réunion du Special Rapporteur Group on the future of UTC et pour la 33^e réunion du PTTI ;
- Tokyo (Japon), du 21 au 28 janvier 2002, invité à visiter le CRL et y faire deux exposés ;
- Tsukuba (Japon), les 29 et 30 janvier 2002, pour une visite du NMIJ.

W. Lewandowski s'est rendu :

- à Salt Lake City (Utah, États-Unis), du 9 au 14 septembre 2001, pour la 38^e réunion du Civil GPS Service Interface Committee (comme président du sous-comité sur le temps), et pour la 14^e réunion technique ION-GPS ;
- à Xi'an (Chine), du 5 au 8 octobre 2001, pour un exposé à la 9^e réunion du Groupe de travail du CCTF sur les comparaisons de temps et de fréquences par aller et retour sur satellite ;
- au NIM, Beijing (Chine), du 9 au 12 octobre 2001, pour discuter de la contribution du NIM au TAI, et pour un exposé ;
- à Varsovie (Pologne), du 5 au 8 novembre 2001 et du 16 au 18 avril 2002, pour un exposé à la 9^e et à la 10^e réunion du groupe de coordination des laboratoires horaires polonais ;

- Nice (France), du 14 au 16 novembre 2001, pour présider la session sur le temps et un exposé au Satellite Navigation and Positioning World Show NavSat 2001 ;
- Daejeon (Rép. de Corée), du 25 au 30 mars 2002, pour l'examen par les pairs du Groupe temps et fréquence du KRISS.

G. Petit s'est rendu à :

- Alpbach (Autriche), du 16 au 20 juillet 2001, invité pour des exposés à l'École d'été de l'ESA « Satellite Navigation Systems for Science and Applications » ;
- Bruxelles (Belgique), du 24 au 26 septembre 2001, pour un exposé aux Journées Systèmes de référence spatio-temporels, intitulé « The new IAU'2000 Conventions for coordinate times and time transformations », et une réunion du conseil de l'IERS ;
- Toulouse (France), les 24 et 25 octobre 2001, pour visiter le Département du temps du CNES et l'Observatoire Midi-Pyrénées ;
- Sèvres (France), les 18 et 19 mars 2002, pour un exposé au 4^e Time Scales Algorithms Symposium, intitulé « An optimal weighting scheme for TAI computation » ;
- Paris (France), les 18 et 19 avril 2002, pour l'atelier de l'IERS sur la mise en pratique des nouvelles résolutions de l'IERS, en tant que membre du comité d'organisation scientifique, et invité à présenter un exposé sur « Coordinate times and time transformations ».

P. Wolf s'est rendu à :

- Saint Andrews (Écosse), du 10 au 14 septembre 2001, pour une présentation au 6^e Symposium on Frequency Standards and Metrology sur « Recoil effects in microwave atomic frequency standards: an update » ;
- Paris (France), le 15 janvier 2002, pour une réunion de l'ONERA sur les projets en physique fondamentale dans l'espace.

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 représente le BIPM à l'Action Team on GNSS de COPUOS. Elle est membre de l'Argentine Council of Research (CONICET) et astronome associée au Département d'astronomie fondamentale (DANOF) de l'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 est membre du Groupe de travail de l'UAI sur la relativité en mécanique céleste, en astrométrie et dans le domaine de la métrologie (RCMAM). Il est co-directeur du Conventions Product Centre de l'IERS. Il est membre du Comité national français de géodésie et géophysique.

P. Wolf est membre du RCMAM et du GREX (Groupe de recherche du CNRS : Gravitation et expériences).

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 et du Groupe de travail du CCTF sur le TAI.

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 Groupe de travail du CCTF sur la normalisation des comparaisons d'horloges utilisant les systèmes satellitaires à couverture globale.

G. Petit est membre du Groupe de travail du CCTF sur le TAI.

4.10 Visiteurs de la section du temps

- M. P. Defraigne (ORB), le 19 octobre 2001.
- MM. N. Demidov et A. Voronstov (Kvarz, Féd. de Russie), du 4 au 18 décembre 2001.

- M. W. Klepczynski (Innovative Solutions International Inc., États-Unis), du 1^{er} au 30 avril 2002.
- M. P. Fisk (NML CSIRO), du 17 au 21 juin 2002.

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 participé cette année au projet 626 de l'EUROMET, destiné à étudier les qualités des réseaux de jonctions de Josephson programmables de 1 V. La procédure adoptée consistait à comparer les résultats de mesures de ce nouveau type de réseaux à ceux des étalons de tension « classiques » de Josephson de chaque participant. Deux réseaux programmables, l'un appartenant à la PTB (Allemagne) et l'autre au VTT (Finlande), ont été envoyés aux participants. Les tensions de sortie de ces deux réseaux programmables ont été comparées directement au BIPM à celle de l'étalon de tension de Josephson du BIPM. Nos résultats ne montrent pas de différence mesurable entre notre réseau classique et les réseaux programmables de la PTB et du VTT. L'incertitude relative de mesure est donnée par l'écart-type de la moyenne, 1×10^{-10} . À la différence des réseaux classiques, il faut appliquer aux réseaux programmables un courant de polarisation. Une autre différence est que, contrairement aux réseaux classiques, les marches de tension sont parfaitement stables. Nous avons démontré que les réseaux programmables peuvent être utilisés pour mesurer une pile étalon directement sans craindre de modifier sa force électromotrice. Les réseaux classiques se comportent différemment : ils risquent de sauter spontanément d'une marche à l'autre, créant ainsi un déséquilibre dans le circuit de mesure qui peut charger ou décharger la pile.

5.1.2 Projet 429 de l'EUROMET : 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 et 2001). Les modifications proposées par le BIPM au premier projet de rapport de la comparaison ont été acceptées et le rapport en

est maintenant au stade du projet B. Nous avons aussi préparé un modèle pour relier les résultats de cette comparaison à ceux de la comparaison clé correspondante continue, BIPM.EM-K11.b, du BIPM.

5.1.3 Mesures de diodes de Zener

En mesurant la tension de sortie des diodes de Zener Fluke modèle 732A à 1,018 V, nous avons observé des valeurs inhabituelles et incohérentes provenant apparemment de forces électromotrices thermiques. Avec notre étalon de tension à réseau de Josephson, nous avons pu localiser la source de ce problème dans une boucle de masse entre le châssis de l'instrument et la terre. Des effets similaires peuvent avoir influencé les résultats de certaines comparaisons précédentes dans lesquelles de telles diodes de Zener ont été étalonnées sur place en utilisant à la fois l'étalon de Josephson du BIPM et celui du laboratoire national de métrologie participant.

5.2 Résistance électrique et impédance

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

Nous avons participé cette année à la comparaison CCEM-K10, une comparaison clé d'étalons de résistance de 100 Ω , dont la PTB est le laboratoire pilote. Les quatre étalons voyageurs de 100 Ω ont été mesurés directement au BIPM en octobre 2001 par rapport à $R_H(2)$, la résistance quantifiée correspondant au plateau $i = 2$ du dispositif à effet Hall quantique. Un pont de résistance du BIPM fondé sur un comparateur cryogénique de courant en continu a été utilisé pour ces mesures. Le dispositif à effet Hall quantique a été maintenu en permanence dans l'hélium liquide pendant trois semaines, période pendant laquelle les quatre étalons ont été mesurés huit fois. Chaque mesure correspond à une période d'acquisition des données d'environ 90 minutes. Les quatre étalons voyageurs se sont avérés stables à quelques 10^{-8} près. Malheureusement, pendant un week-end de cette période, le bain d'huile thermorégulé est tombé en panne, occasionnant une surchauffe des étalons et une légère dérive de leur valeur. Cet incident a été immédiatement signalé au laboratoire pilote.

La section d'électricité utilise trois bains d'huile, qui ont tous vingt-cinq ou trente ans. Compte tenu du coût élevé de leur remplacement et des spécifications données par les fabricants, nous avons décidé de les rénover nous-mêmes. Nous avons commencé par le bain d'huile en panne. Le capteur de température a été remplacé par un nouveau capteur en platine de 100 Ω et

le régulateur par un dispositif commercial de type proportionnel, intégral et différentiel. Un contacteur à état solide a été utilisé pour contrôler le courant alternatif appliqué au dispositif de chauffage. Le dispositif de chauffage original et les éléments de refroidissement à effet Peltier ont été conservés. Nous avons aussi installé un nouveau dispositif de sécurité pour déconnecter le bain de l'alimentation secteur quand la température se situe en dehors d'un domaine spécifié. Enfin, tous les joints d'étanchéité du bain d'huile ont été changés. Les performances du bain d'huile rénové sont très satisfaisantes : la température en un point donné dans l'huile en circulation est stable à mieux que 1 mK et le gradient de température du bain n'excède pas quelques millikelvins.

Lors de sa 22^e session en septembre 2000, le CCEM a demandé à F. Delahaye et à B. Jeckelman (METAS) de préparer une version révisée des « Technical Guidelines for Reliable dc Measurements of the Quantized Hall Resistance » publiées en 1988 par le Groupe de travail du CCEM sur l'effet Hall quantique. Nous avons maintenant préparé un premier projet du texte révisé. Pour engager la discussion avant la réunion du CCEM en septembre 2002, le texte a été présenté le 15 juin 2002 à la réunion de l'EUROMET des experts dans le domaine de l'effet Hall quantique. Le texte révisé comprend une mise à jour de la bibliographie et des suggestions supplémentaires pour sélectionner les dispositifs de Hall, mesurer la résistivité longitudinale et évaluer la qualité des contacts.

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

Nous estimons l'incertitude relative sur notre réalisation actuelle de la représentation du farad fondée sur la valeur recommandée de la constante de von Klitzing à environ 4×10^{-8} . Nous avons débuté un programme destiné à réduire cette incertitude. Nous avons cette année pour objectif d'améliorer les performances et la détermination des caractéristiques de la résistance calculable alternatif-continu qui relie les mesures aux fréquences de l'ordre du kilohertz à celles à très basses fréquences (1 Hz). Nous n'étions pas entièrement satisfaits des performances de la résistance que nous avons fabriquée l'an passé. Il s'agit d'une résistance coaxiale alternatif-continu, de valeur nominale $1290,6 \Omega$, dont l'élément résistif fin en Evanohm est fixé mécaniquement à des tiges en Evanohm servant de support. Bien que les résistances de contact aux points de fixation soient stables dans le temps, nous craignons qu'il ne subsiste une légère dépendance en fonction de la

fréquence. Par conséquent, nous avons construit une nouvelle résistance coaxiale, de valeur nominale 1290,6 Ω , dont l'élément résistif est soudé par point au support au moyen d'une machine à souder achetée spécialement cette année dans ce but. Nous avons aussi construit une deuxième résistance coaxiale, de valeur nominale 645,3 Ω , pour vérifier que le rapport 2/1 entre les deux résistances est réellement indépendant de la fréquence. Une telle vérification est particulièrement significative quand elle est effectuée avec des résistances de valeur nominale différente, parce que la plupart des effets résiduels dépendant de la fréquence, comme les courants de Foucault au niveau des tiges de support et du blindage, produisent des variations absolues de résistance indépendantes de la valeur nominale de la résistance. Les caractéristiques préliminaires ont été déterminées. La variation relative du rapport de résistance de 2/1 de 1600 Hz à 3200 Hz est inférieure à 4×10^{-9} , ce qui représente l'incertitude des mesures. Nous améliorons maintenant ces mesures de rapport et nous étendons le domaine de fréquence exploré.

Suite aux comparaisons clés de mesures de capacité CCEM-K4 et EUROMET.EM-K4, le NPL a demandé au BIPM d'effectuer une comparaison bilatérale d'étalons de capacité de 10 pF et de 100 pF à 1592 Hz et à 1000 Hz. La comparaison bilatérale a eu lieu en avril-mai 2002 au moyen de deux séries d'étalons voyageurs, l'une appartenant au NPL et la seconde au BIPM. Les étalons voyageurs du BIPM sont deux étalons de capacité de 10 pF et deux étalons de 100 pF dans une enceinte thermorégulée acquise il y a deux ans (AH modèle 11A). Leurs coefficients de variation en fonction de la fréquence, de la tension et de la température, ainsi que leur dérive à long terme, ont été déterminés au BIPM. Les résultats de la comparaison indiquent que les deux laboratoires s'accordent dans les limites de l'incertitude étendue ($k = 2$) composée des mesures.

5.3 Automatisation des mesures de tension (D. Reymann et T.J. Witt ; R. Chayramy)

La section d'électricité a commencé une automatisation plus complète de ses mesures de tension.

La mise au point de réseaux de connexion de haute qualité pour sélectionner les diodes de Zener et les piles à mesurer et pour renverser la polarité constitue un élément clé de l'automatisation des mesures de tension. Cette application nécessite des connecteurs à force thermo-électromotrice faible et à résistance de fuites élevée. Nous utilisons actuellement des connecteurs rotatifs manuels pour cette activité. Nous avons mis au point cette année un

assemblage prototype de connexion rapide et fiable, adaptable aux connexions manuelles existantes. Ce système utilise un moteur pas à pas compact capable de fournir le couple de torsion, l'exactitude et la vitesse nécessaires à nos besoins. Le moteur est piloté par une unité d'acquisition et de contrôle des données reliée par un bus IEEE-488. Les essais de performances effectués avec un connecteur de renversement de polarité démontrent que celui-ci est fiable et indiquent que les forces thermo-électromotrices moyennes sont de l'ordre de 1 nV avec un écart-type de la moyenne un peu en-dessous de 1 nV.

5.4 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. Nous avons poursuivi aussi cette année nos études sur le palier du bruit en $1/f$, qui constitue la limite ultime de l'incertitude des mesures d'étalons à diodes de Zener, ainsi que sur la stabilité et le niveau du bruit des nanovoltmètres utilisés pour les mesures des diodes de Zener et des étalons à effet Josephson.

La détermination expérimentale de la distribution d'échantillonnage de variance d'Allan pour les mesures en courant continu, mentionnée dans le Rapport du directeur de 2001, a été étendue à quatre situations de mesure de bruit intrinsèque : deux nanovoltmètres, l'un numérique et l'autre analogique, étant utilisés pour mesurer du bruit blanc et du bruit en $1/f$. Les mêmes instruments ont ensuite été utilisés pour mesurer la différence de tension entre deux étalons de tension de référence à diode de Zener de 10 V connus, d'après nos précédentes mesures, pour avoir un niveau de bruit en $1/f$ significatif. Les séries de mesures, constituées chacune de $N = 4096$ ou 8192 mesures de tension, ont été répétées entre 600 et 1300 fois. La variance d'Allan a été calculée pour toutes les durées d'échantillonnage multiples, $n = 2^k$ (où k est un nombre entier positif), de la durée nécessaire pour une seule observation. Les histogrammes de variances d'Allan, obtenus pour chaque durée d'échantillonnage et pour des centaines de séries, ressemblent à une distribution de khi-carré. Le nombre de degrés de liberté est estimé à partir de la valeur moyenne de la durée d'échantillonnage et de la variance d'Allan. Ceci permet ensuite de vérifier la validité de l'ajustement de la distribution expérimentale à la distribution de khi-carré ayant le nombre de degrés de liberté obtenu. L'hypothèse selon laquelle il n'y a pas de différence

entre la distribution observée et une distribution en khi-carré, ne peut pas être rejetée compte tenu de l'incertitude à un niveau de confiance de 95 %. De plus, pour chacune des quatre situations de mesure, on constate que le nombre de degrés de liberté obtenu varie environ comme $2N/3n$. Cela permet alors de calculer l'intervalle de variance d'Allan dans lequel se situe la population à un niveau de confiance donné. Ce devrait être utile pour interpréter les résultats expérimentaux destinés à comparer les performances des différents instruments. Ce devrait être aussi utile pour prédire le nombre de mesures nécessaires permettant d'atteindre un certain niveau de confiance lorsque l'on met au point des expériences. Ce travail a été présenté à la CPEM 2002.

Un autre domaine de recherche a été ouvert par l'application de la variance d'Allan et des méthodes d'analyse spectrale aux procédures classiques de renversement de polarité. Nous avons aussi étudié l'application de certaines de ces méthodes récemment mises au point pour analyser les procédés de mémorisation à long terme, présentant du bruit en $1/f$. Une des méthodes étudiées est la méthode d'analyse des fluctuations redressées.

5.5 Comparaisons clés continues du BIPM d'étalons électriques (T.J. Witt et D. Reymann ; D. Avrons)

Depuis octobre 2001 nous avons achevé deux nouvelles comparaisons bilatérales avec le NML (Irlande) dans le cadre du programme de comparaisons clés continues du BIPM. L'une de ces comparaisons est une comparaison de tension en continu (diodes de Zener) à 1,018 V, la comparaison clé BIPM.EM.K11.a, et la seconde est une comparaison d'étalons de tension en continu (diodes de Zener) à 10 V, la comparaison BIPM.EM-K11.b. Les résultats ont été approuvés par le CCEM pour inclusion dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés.

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

Nous avons effectué cette année les étalonnages suivants : étalons à diode de Zener à 1,018 V et à 10 V pour l'Égypte et la Roumanie ; résistances de 1Ω pour l'Autriche, la Belgique, le Brésil, la République tchèque, la Roumanie et la Turquie ; résistances de 100Ω pour la Turquie ; résistances de 10Ω pour l'Autriche, la Belgique, le Brésil, le Danemark, la Roumanie et la Turquie ; et étalons de capacité de 10 pF pour la Belgique et la Turquie.

5.7 Publications, conférences et voyages : section d'électricité

5.7.1 Rapports BIPM

1. Vrabček P., Reymann D., Witt T.J., Bilateral comparison of 1.018 V and 10 V standards between the SMU, Slovakia and the BIPM, April 2001, *Rapport BIPM-2001/05*, 2001, 7 p.
2. Sochocka D., Stanioch W., Reymann D., Witt T.J., Bilateral comparison of 1.018 V and 10 V standards between the GUM, Poland and the BIPM, May 2001, *Rapport BIPM-2001/06*, 2001, 7 p.
3. Power O., Reymann D., Witt T.J., Bilateral comparison of 1.018 V and 10 V standards between the NML (Ireland) and the BIPM, March 2002, *Rapport BIPM-2002/05*, 2002, 7 p.

5.7.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

T.J. Witt s'est rendu :

- au Groupe de travail du CCL sur la métrologie dimensionnelle, le 18 septembre 2001, pour un exposé intitulé « The analysis of comparison results » ;
- au CCAUV, le 5 octobre 2001, pour un exposé intitulé « Stochastic correlations in dc electrical measurements » ;
- à l'IEN, Turin (Italie), le 22 octobre 2001, pour une réunion du Conseil scientifique de l'IEN ;
- à Harrogate (Royaume-Uni), du 6 au 8 novembre 2001, pour participer à la British Electromagnetic Measurement Conference et invité à présenter un exposé intitulé « Maintenance and dissemination of representations of the volt by Zener-diode based dc voltage references » ;
- à la réunion des personnes chargées de l'électricité et du magnétisme au sein de l'EUROMET, à Prague (Rép. tchèque), les 21 et 22 novembre 2001, pour un exposé intitulé « Remarks on uncertainty calculations for key comparisons with a few examples from CCEM key comparisons » ;
- à Rio de Janeiro (Brésil), du 8 au 12 avril 2002, pour participer à la conférence V SEMETRO et invité à présenter un exposé intitulé « Random noise in dc electrical measurements ». Le 9 avril, il a visité les laboratoires de l'INMETRO à Xerém.

T.J. Witt, F. Delahaye et D. Reymann se sont rendus :

- au NRC, Ottawa (Canada), le 15 juin 2002, à la réunion des experts de l'effet Hall quantique et de l'effet Josephson organisée par l'EUROMET : T.J. Witt y a présenté un exposé intitulé « Serial correlations in electrical measurements » et F. Delahaye « Revised technical guidelines for reliable dc measurements of the quantized Hall resistance » ;
- à la CPEM 2002, Ottawa (Canada), du 17 au 21 juin 2002 : T.J. Witt y a présenté un exposé intitulé « Experimental sampling distributions and confidence intervals of the Allan variance in some dc electrical measurements » ; D. Reymann était co-auteur d'un exposé intitulé « Analysis of different set-ups for a programmable Josephson voltage standard » ; F. Delahaye et T.J. Witt y ont présenté un poster intitulé « Linking the results of key comparison CCEM-K4 with the 10 pF results of EUROMET Project 345 ».

T.J. Witt et F. Delahaye se sont rendus au NRC, Ottawa (Canada), le 15 juin 2002, pour une réunion non-officielle du Groupe de travail du CCEM sur les mesures de résistance de Hall quantifiée en courant alternatif.

F. Delahaye s'est rendu à la PTB, Braunschweig (Allemagne), les 29 et 30 octobre 2001, pour un atelier intitulé « Modular system for the calibration of capacitance standards based on the quantum Hall effect » ; il y a présenté un exposé intitulé « Optimizing ac measurements of the quantized Hall resistance ».

D. Reymann s'est rendu à la PTB, Berlin (Allemagne), le 11 mars 2002, pour une réunion de l'EUROMET sur les réseaux de Josephson programmables.

5.8 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 (révision du VIM).

5.9 Activités liées au travail des Comités consultatifs

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

D. Reymann est chargé de la révision du rapport de la comparaison clé CCEM-K3.

T.J. Witt et F. Delahaye ont revu le rapport de la comparaison clé CCEM-K4 et ont proposé la méthode permettant de relier les résultats de la comparaison de 10 pF effectuée dans le cadre du projet 345 de l'EUROMET à ceux de CCEM-K4.

T.J. Witt est chargé de la révision du rapport de la comparaison clé CCEM-K6.a.

5.10 Visiteurs de la section d'électricité

- M. G. Rocha (INMETRO), le 11 septembre 2001 et le 20 mars 2002.
- M. G. Small (NML CSIRO), du 20 au 29 novembre 2001, pour des discussions sur le condensateur calculable.
- M. F. Piquemal et Mme S. Djordjevic (BNM-LNE), le 27 mars 2002.
- M. S. Awan (NPL), le 22 avril et le 21 mai 2002.
- M. A. Klushin (Institut für Schichten und Grenzflächen, Jülich, Allemagne), le 24 avril 2002.
- M. B. Jeckelmann (METAS), le 23 mai 2002.
- M. B. van Oostrom (CSIR-NML), le 4 juin 2002.
- M. J. Fiander (NML CSIRO), le 28 juin 2002.

6 **RADIOMÉTRIE, PHOTOMÉTRIE ET THERMOMÉTRIE** (R. KÖHLER*, puis M. STOCK)

6.1 Radiométrie (R. Goebel et M. Stock)

La comparaison internationale de mesures de sensibilité spectrale dans le domaine de longueur d'ondes compris entre 300 nm et 1000 nm (CCPR-K2.b), dont le BIPM est le laboratoire pilote, est maintenant terminée. Le projet A de rapport a été préparé par le BIPM et il a été envoyé aux

* Jusqu'au 31 août 2001.

participants. Après discussion de ces résultats préliminaires, le Groupe de travail du CCPR sur les comparaisons clés a demandé au BIPM de préparer un supplément au projet A, présentant les résultats analysés par rapport à la valeur de référence de la comparaison clé calculée au moyen de diverses méthodes. Ce supplément est en préparation et sera aussi envoyé comme support aux discussions pour le choix final de la valeur de référence.

Le radiomètre cryogénique du BIPM est maintenu en bon état de marche et utilisé pour continuer les étalonnages de routine des récepteurs à piège du BIPM qui servent de fondement aux mesures absolues en photométrie, spectro-radiométrie et en thermométrie par rayonnement.

Une coopération a débuté avec le NMIJ (Japon) sur la détermination des caractéristiques des points fixes d'eutectiques métal-carbone. Ces nouveaux matériaux sont des candidats potentiels comme points fixes pour les hautes températures d'une future échelle de température, dont le besoin a été exprimé dans la Recommandation T 2 (1996) du CCT. Il est envisagé de mesurer la température thermodynamique des plateaux de fusion et de congélation au moyen de radiomètres à filtre étalonnés par rapport à notre radiomètre cryogénique. Les premières mesures seront faites aux longueurs d'onde de 700 nm et 800 nm, longueurs d'onde par lesquelles l'étalonnage des radiomètres à filtre peut être vérifié par rapport aux mesures effectuées avec le corps noir à caloduc et des thermomètres à résistance de platine étalonnés.

6.2 Photométrie (R. Goebel, S. Solve et M. Stock)

Suite à l'approbation par le CIPM en 2001 de la Recommandation P 1 (2001) du CCPR, les valeurs assignées aux groupes de lampes conservant les unités photométriques d'intensité lumineuse et de flux lumineux au BIPM ont été ajustées sur les valeurs de référence des comparaisons clés correspondantes. La réalisation primaire du lumen et de la candela sera utilisée à l'avenir pour vérifier la stabilité de ces groupes de lampes. Nous travaillons actuellement à l'installation permanente de l'expérience pour la réalisation absolue du lumen.

Les étalonnages de lampes photométriques de flux lumineux et d'intensité lumineuse pour plusieurs États membres de la Convention du Mètre ont recommencé après une interruption due à la modernisation du laboratoire de photométrie pendant la période couverte par le précédent rapport du directeur. En 2002 nous pensons effectuer des étalonnages pour sept laboratoires différents, un nombre plus élevé que lors de chacune des dix

années passées. Ces étalonnages ont été à plusieurs reprises une bonne occasion d'avoir des discussions utiles avec les utilisateurs sur les conditions de fonctionnement de ces étalons.

6.3 Thermométrie (S. Solve et M. Stock)

En septembre 2001, le CCT a décidé de mener une nouvelle comparaison clé de cellules à points triples de l'eau. Le BIPM a été chargé d'organiser cette comparaison, avec l'aide du BNM-INM (France), du NIST (États-Unis) et de l'UME (Turquie). Pour préparer cette comparaison, S. Solve a travaillé dans le laboratoire de thermométrie du NIST pendant une semaine. Le protocole technique a été élaboré en étroite collaboration avec le BNM-INM et le NIST. La comparaison aura deux objectifs distincts : 1) comparer directement un grand nombre de cellules à point triple de l'eau pour mesurer la différence entre des cellules de haute qualité ; et 2) une comparaison des étalonnages de ces cellules fournis par les participants, pour aider à étayer les déclarations futures d'aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages. La comparaison sera organisée en étoile, les cellules étant mesurées dans chaque laboratoire participant par rapport à l'étalon national de référence et ensuite comparées au BIPM. Le travail dans notre laboratoire demandera au moins six mois de mesures quotidiennes pour la comparaison. Deux membres du personnel du BNM-INM et de l'UME nous aideront pendant cette période.

En vue de cette comparaison, les équipements pour la thermométrie ont été modernisés afin de réduire le temps nécessaire aux mesures et les incertitudes de mesure. Le vieux pont de résistance à commande manuelle a été remplacé par un nouveau pont automatique. Pour choisir le nouvel instrument, des mesures d'essai ont été faites de tous les modèles à l'étude. Le nouveau pont a été livré et les premières vérifications faites correspondaient aux spécifications. Pour réduire l'incertitude due aux variations de température de la résistance de référence, un bain d'huile thermorégulé a été acheté. Deux bains de conservation automatiques ont été commandés pour la maintenance des cellules à point triple de l'eau, afin de remplacer le conteneur rempli de glace broyée.

Nous travaillons actuellement à établir un nouveau bilan d'incertitude applicable à la comparaison de deux cellules à point triple de l'eau, et nous espérons être capables de réduire l'incertitude de sa valeur actuelle de 40 μK à une valeur comprise entre 20 μK et 30 μK . C'est fondamental, parce que les différences de température entre les cellules à point triple de l'eau ne devraient pas excéder sensiblement ces valeurs.

Dans les prochaines semaines, le laboratoire de thermométrie sera relogé dans la salle 9 afin de permettre d'utiliser la salle 3 pour les travaux futurs sur la thermométrie par rayonnement.

6.4 Étalonnages (R. Goebel et S. Solve)

Les étalonnages de lampes photométriques de flux lumineux et d'intensité lumineuse pour les laboratoires nationaux de métrologie des États membres de la Convention du Mètre ont repris.

Douze thermomètres ont été étalonnés pour la section d'électricité, entre le point triple de l'eau et le point de fusion du gallium. Trois nouveaux thermomètres à résistance de platine étalons (de type capsule et dont la résistance est de 25Ω à 0°C) ont aussi été étalonnés entre 0°C et 30°C . Nous avons déterminé les caractéristiques d'une cellule à point triple de l'eau pour l'INMETRO.

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

6.5.1 Publications extérieures

1. Mangum B.W., Stock M. *et al.*, Summary of comparison of realizations of the ITS-90 over the range 83.8058 K to 933.473 K: CCT key comparison CCT-K3, *Metrologia*, 2002, **39**, 179-205.
2. Stock M., Adjustment of the photometric standards maintained at the BIPM, Letter to the Editor, *Metrologia*, 2002, **39**, 113-114.

6.5.2 Rapport BIPM

3. Köhler R., Stock M., Garreau C., Final Report on the International Comparison of Luminous Responsivity CCPR-K3.b, November 2001, *Rapport BIPM-2001/09*, 2001, 22 p.

6.5.3 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

M. Stock s'est rendu :

- au BNM-INM, Paris (France), le 7 septembre 2001, pour un atelier du Groupe de travail 5 du CCT sur la thermométrie par rayonnement ;

- à la PTB, Berlin (Allemagne), du 23 au 25 janvier 2002, pour visiter les laboratoires de thermométrie et pour la cérémonie de départ à la retraite de M. Wende ;
- au BNM-INM, Paris (France), le 27 mars 2002, pour discuter du protocole de la comparaison clé de cellules à point triple de l'eau ;
- au METAS, Bern (Suisse), les 8 et 9 avril 2002, pour une réunion des personnes chargées des relations dans le domaine de la radiométrie et de la photométrie au sein de l'EUROMET ;
- au NIST, Gaithersburg (États-Unis), du 19 au 24 mai 2002, pour la conférence NEWRAD, pour une réunion du Groupe de travail du CCPR sur les comparaisons clés et pour visiter les laboratoires.

R. Goebel s'est rendu au NIST, Gaithersburg (États-Unis), du 19 au 24 mai 2002, pour la conférence NEWRAD et pour visiter les laboratoires.

S. Solve s'est rendu au :

- NIST, Gaithersburg (États-Unis), du 2 au 8 février 2002, pour visiter les laboratoires de thermométrie du NIST et pour la préparation de la comparaison de cellules à point triple de l'eau ;
- BNM-INM, Paris (France), le 27 mars 2002, pour discuter du protocole de la comparaison clé de cellules à point triple de l'eau ;
- NIST, Gaithersburg (États-Unis), du 19 au 24 mai 2002, pour la conférence NEWRAD et pour visiter les laboratoires.

6.6 Activités liées au travail des Comités consultatifs

M. Stock 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.

6.7 Visiteurs de la section de radiométrie, photométrie et thermométrie

- M. R. Teixeira (INMETRO), le 10 octobre 2001, pour apporter une cellule à point triple de l'eau à caractériser et pour visiter les laboratoires.
- M. Y. Hermier et Mme E. Renaot (BNM-INM), le 5 novembre 2001, pour effectuer des essais avec un nouveau pont de résistance.
- M. Y. Ichino (NMIJ), le 15 février 2002, pour visiter les laboratoires.

- M. G. Popovici (INM, Roumanie), le 11 mars 2002, pour apporter des lampes photométriques à étalonner.
- M. F. Leta (Universidade Federal Fluminense, Brésil), le 11 avril 2002, pour visiter les laboratoires.
- M. H. Karlsson (JV), le 24 avril 2002, pour visiter les laboratoires.
- Mme C. Rives (BNM-INM), le 6 mai 2002, pour visiter le laboratoire de thermométrie.
- M. V. Skerovic (SZMDM), le 3 juin 2002, pour apporter des lampes photométriques à étalonner et pour visiter les laboratoires.

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

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

7.1.1 Calculs de Monte Carlo pour la nouvelle source de ^{60}Co

La tête de téléthérapie pour la source de ^{60}Co à 250 TBq diffère dans sa conception de la tête de l'ancienne source, et il faut à nouveau évaluer les composantes du rayonnement diffusé et certains facteurs de correction pour les étalons de kerma dans l'air et de dose absorbée du BIPM. Au cours de la première étape de ce travail, nous avons utilisé le code de Monte Carlo PENELOPE pour calculer la distribution d'énergie des photons dans le plan de référence, en utilisant un modèle réaliste pour la tête de la source. Ces résultats ont été utilisés pour optimiser les réglages du collimateur afin de donner au domaine de radiation la taille requise.

La deuxième étape a débuté ; il s'agit du calcul du facteur de correction concernant les parois pour l'étalon de kerma dans l'air, et du facteur de correction pour la non-uniformité axiale dans la nouvelle source. Il semble, d'après les premières indications, que la valeur de la correction de paroi n'aura pas à être modifiée, compte tenu de l'incertitude relative établie (8×10^{-4}).

7.1.2 Étalons et équipements pour la dosimétrie

Après avoir remplacé les deux générateurs à haute tension utilisés pour les rayons x aux moyennes énergies, un nouveau diviseur de tension a été construit pour le générateur négatif et il est maintenant couramment utilisé. Le système, de conception nouvelle, a un coefficient de température nettement inférieur à celui du modèle précédent, qui est toujours utilisé pour le diviseur positif. Une fois que la stabilité du nouveau diviseur négatif sera établie, un diviseur positif sera construit sur le même modèle.

La correction pour l'effet de polarité de l'étalon aux moyennes énergies a été mesurée à mieux que 10^{-4} , pour permettre une utilisation normale avec une seule polarité. Cela simplifie les procédures de mesure, augmente la stabilité et améliore les corrections pour la dérive.

Les systèmes de sécurité et de protection contre les rayonnements sont en place pour la source de ^{60}Co à 250 TBq et le profil du faisceau de rayonnement a été mesuré dans le plan de référence. Le faisceau de rayonnement n'est pas dans l'axe géométrique de la source et du collimateur et son axe a maintenant été déterminé à mieux que 0,1 mm près. Un dispositif mécanique a été conçu et installé pour faciliter la vérification du système de positionnement en utilisant un faisceau laser. Les différents facteurs de correction pour l'étalon de kerma dans l'air sont en cours de mesure.

La possibilité d'utiliser un étalon de kerma dans l'air aux basses énergies pour la dosimétrie des spectres simulés pour la mammographie est à l'étude.

7.1.3 Comparaisons de dosimétrie

Après remplacement des générateurs de rayons x aux moyennes énergies, des comparaisons ont été effectuées au moyen de chambres de transfert avec l'ARPANSA (Australie), le BEV (Autriche) et le NIM (Chine). Une comparaison de rayons x aux basses énergies a aussi été effectuée avec l'ARPANSA. Cinq rapports ont été publiés sur les comparaisons de rayons x avec le NPL (Royaume-Uni), la PTB (Allemagne) et le VNIIM (Russie), et les rapports des comparaisons avec le BEV, le NIST (États-Unis), le NRC (Canada) et l'OMH (Hongrie) seront bientôt terminés.

Suite à la décision du CCRI d'exclure de la base de données du BIPM sur les comparaisons clés les comparaisons qui n'ont pas fait l'objet d'une publication, et d'inclure à titre provisoire certaines comparaisons publiées datant de plus de dix ans, les résultats des comparaisons de rayons x aux basses et aux moyennes énergies ont été de nouveau analysés. Ce travail sera

bientôt achevé avec l'inclusion dans la base de données des résultats publiés les plus récents.

Les résultats de la comparaison supplémentaire CCRI(I)-S1 aux doses élevées, dont le BIPM est le laboratoire pilote, ont été analysés pour faire l'objet d'un article qui a été envoyé aux laboratoires participants pour commentaires. Cet article sera soumis à *Radiation Physics and Chemistry* après accord des participants.

Des comparaisons de dosimétrie d'étalons de kerma dans l'air pour le rayonnement gamma ont été entreprises avec le NCM (Bulgarie), le NIM et le SZMDM (Yougoslavie). Le rapport relatif au NIM est en préparation ; les rapports relatifs au NCM et au SZMDM, ainsi que celui d'une précédente comparaison avec le SMU (Slovaquie), ont été publiés. Un certain nombre d'autres comparaisons précédentes dans ce domaine sont en attente de publication, notamment ceux des comparaisons avec le BARC (Inde), l'ENEA (Italie), le NMIJ (Japon), le NPL et la PTB. Comme certaines questions concernant les facteurs de correction relatifs aux étalons primaires sont encore en discussion, le CCRI tient à ce qu'aucun résultat ne figure dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés tant que ces questions n'auront pas été réglées au niveau international.

Une première comparaison de dose absorbée dans l'eau pour le rayonnement du ^{60}Co a été effectuée avec l'OMH, et un projet de rapport a été préparé. Les rapports de précédentes comparaisons avec le METAS (Suisse), le NPL et le VNIIFTRI (Féd. de Russie) seront bientôt prêts. Tous ces résultats seront inclus dans le projet B de rapport des comparaisons clés dans ce domaine avant la fin de l'année 2002.

La comparaison clé du CCRI de dose absorbée dans l'eau pour le rayonnement gamma du ^{60}Co s'est poursuivie cette année. Des mesures ont été effectuées avec l'OMH qui a fourni une des chambres de transfert. Dix laboratoires nationaux de métrologie sur treize ont participé à cette comparaison avec des étalons déclarés comme étant des étalons primaires. Les résultats sont en cours d'analyse pour le projet A de rapport. Le BIPM continue à contrôler les trois étalons de transfert pour pouvoir étendre la participation à la comparaison si nécessaire.

Les quatre chambres 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 ; elles ont un comportement cohérent. Le METAS participera à cette comparaison en 2002.

7.1.4 Étalonnage d'étalons nationaux pour la dosimétrie

Au total, dix séries d'étalonnages d'étalons nationaux de rayons x aux basses et aux moyennes énergies ont été effectuées pour le CRRD (Argentine), le CSIR-NML (Afrique du Sud), le KRISS (Rép. de Corée), le LNMRI (Brésil), le NIS (Égypte) et le SZMDM (Yougoslavie).

Dix-neuf étalonnages d'étalons nationaux ont été effectués dans les faisceaux de rayonnement gamma du BIPM pour le kerma dans l'air, la dose absorbée dans l'eau ou l'équivalent de dose ambiant, en réponse à la demande du CRRD, de l'HIRCL (Grèce), du KRISS, du LNMRI, du NCM, du NIS, du SRPI (Suède) et du SZMDM.

Le BIPM continue à soutenir le programme de vérification en dosimétrie de l'AIEA et de l'OMS en fournissant des irradiations de référence.

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

7.2.1 Comparaisons clés internationales de mesures d'activité

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

Les douze laboratoires participant à cette comparaison ont mesuré l'activité d'une solution de ^{238}Pu (préparée et envoyée par le NPL) et ont envoyé leurs résultats au BIPM. Onze méthodes ont été utilisées, qui ont donné vingt-cinq résultats indépendants. Une mesure supplémentaire effectuée par le laboratoire qui avait obtenu un résultat très bas a confirmé la valeur obtenue précédemment avec le même échantillon. Les résultats se situent à $\pm 0,65\%$ près de part et d'autre de la moyenne arithmétique de la comparaison, si l'on exclut le résultat aberrant. Un rapport est en préparation.

L'activité de la solution de ^{238}Pu a été mesurée au BIPM avec un détecteur à scintillation liquide et avec le compteur proportionnel opérant à la pression atmosphérique. Pour ce dernier, le taux de comptage alpha a été corrigé pour tenir compte des temps morts, du fond de rayonnement et de l'auto-absorption de la source et des films de VYNSTM. Cette dernière correction, de l'ordre de 1,005, a été obtenue en ajoutant plusieurs films de VYNS sur une source et en extrapolant le taux de comptage pour une épaisseur de film égale à zéro. L'incertitude-type relative composée de l'activité mesurée est de

* En temps partagé avec *Metrologia*.

$3,2 \times 10^{-3}$. Elle provient principalement de la méthode d'extrapolation et a été déduite de la mesure d'une solution de ^{241}Am dont l'activité est connue.

ii) Comparaison de mesures d'activité d'une solution de ^{204}Tl

Une nouvelle comparaison de mesures d'activité d'une solution de ^{204}Tl a débuté et compte vingt participants. D'après les conclusions du Groupe de travail de la Section II du CCRI sur le ^{204}Tl , une solution contenant 31 $\mu\text{g/g}$ de TlCl dans 0,1 mol de HCl a été préparée par le BNM-LNHB (France). La faible concentration en entraîneur a pour but d'éviter les problèmes rencontrés au cours du précédent exercice, et les ampoules ont été traitées avant d'être remplies avec une solution inactive de sel afin de réduire l'adsorption potentielle au niveau des parois. L'activité de la solution était approximativement de 100 kBq/g à la date de référence. La faible réponse de la chambre d'ionisation du SIR aux rayons x à 68,9 keV pour la solution de ^{204}Tl montre qu'il n'est pas nécessaire d'effectuer des mesures systématiques de toutes les ampoules avant l'envoi. On a distribué un formulaire amélioré à utiliser pour déclarer les résultats ; il reflète les décisions du groupe de travail.

iii) Comparaison de mesures d'activité d'une solution de ^{32}P

La comparaison de mesures d'activité d'une solution de ^{32}P a débuté au printemps 2002 ; elle compte seize participants. La solution a été préparée et distribuée par la PTB. La période relativement courte de ce radionucléide ($T_{1/2} = 14,262 (0,014)^* \text{ d}$) impose une date de référence proche de celle des mesures afin de réduire les incertitudes liées à la désintégration. Des mesures sont nécessaires, non seulement pour déterminer l'activité, mais aussi pour corriger l'éventuelle contamination due au ^{33}P qui est aussi un émetteur de rayonnement β pur ($T_{1/2} = 25,34 (0,12) \text{ d}$).

iv) Comparaison de mesures d'activité d'une solution de ^{65}Zn

La comparaison de mesures d'activité d'une solution de ^{65}Zn est en cours. La solution (ZnCl_2 dans 0,1 mol de HCl) a été fournie par l'IRMM. Une solution d'entraîneur a été ajoutée pour réduire la concentration en activité à environ 150 kBq/g à la date de référence. Pour prévenir l'adsorption au niveau des parois des ampoules, l'IRMM a traité les ampoules de type NBS avec une solution inactive de zinc. Toutes les ampoules ont été mesurées dans le SIR au BIPM, puis envoyées aux vingt-deux laboratoires participants.

* Le nombre entre parenthèses est la valeur numérique de l'incertitude-type exprimée dans la même unité que le résultat cité.

v) *Comparaison de mesures d'activité d'une solution de ^{241}Am*

La comparaison de mesures d'activité d'une solution de ^{241}Am a aussi débuté au printemps 2002. La solution a été préparée par le NPL. La concentration en acide (HNO_3) est de $0,5 \text{ mol/dm}^3$ et la concentration en entraîneur est aussi faible que possible pour réduire l'auto-absorption. Trente ampoules de type NBS ont été préparées, contenant chacune 3,6 g de solution, ce qui est nécessaire pour les mesures dans le SIR. Comme les radionucléides à toxicité radioactive élevée et à période longue ($T_{1/2} = 1,5785 (0,0024) \times 10^5 \text{ d}$) sont soumis à une réglementation spéciale pour le transport, le NPL a aussi assumé la responsabilité d'envoyer les sources aux vingt et un participants en juin 2002, la date d'achèvement de la comparaison étant fixée à fin 2003. En même temps, quatre ampoules remplies d'une solution d'une concentration radioactive dix fois supérieure ont été préparées pour permettre des mesures de référence dans le SIR.

vi) *Autres comparaisons*

La comparaison de mesures d'activité du ^{54}Mn a été repoussée à une date ultérieure car une nouvelle solution doit être fournie. La PTB a mesuré la solution mère originale et a décelé une contamination en ^{55}Fe due à la procédure de production.

Les rapports des précédentes comparaisons de mesures d'activité de ^{152}Eu et de ^{89}Sr , rédigés par le BIPM, sont en préparation.

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

En 2001, le BIPM a reçu vingt-trois ampoules en provenance de douze laboratoires : le BARC, le BEV, le BNM-LNHB, le CIEMAT (Espagne), le CMI-IIR (Rép. tchèque), l'ININ (Mexique), l'IRA, le NIST, le NMIJ, l'OMH, la PTB et le VNIIM. Dix-huit radionucléides différents ont été soumis : ^{18}F , ^{22}Na , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{59}Fe (2 résultats), ^{60}Co (2 résultats), ^{65}Zn , ^{67}Ga , ^{85}Sr , ^{88}Y (2 résultats), $^{110}\text{Ag}^m$, ^{111}In , ^{131}I , ^{133}Xe , ^{134}Cs , ^{137}Cs (2 résultats), ^{152}Eu (2 résultats) et ^{222}Rn , ce qui fournit vingt-trois nouveaux résultats. Le nombre cumulé d'ampoules mesurées depuis l'introduction du SIR en 1976 est maintenant de 818, ce qui correspond à 590 résultats indépendants. Tous les résultats obtenus en 2001 ont été approuvés par les participants. Depuis les débuts du SIR, 39 résultats seulement ont été retirés, ce qui représente 6,6 % du nombre de résultats enregistrés. Le nombre de radionucléides différents mesurés dans le SIR est maintenant de 62.

Il y a deux nouveaux radionucléides, le ^{18}F ($T_{1/2} = 1,829 (0,001) \text{ h}$) et le ^{222}Rn ($T_{1/2} = 3,8235 (0,0003) \text{ d}$). La période du ^{18}F est si courte que l'algorithme servant à déterminer l'activité équivalente dans le SIR, A_e , a dû être modifié pour tenir compte de la désintégration pendant la mesure, ce qui a introduit un changement d'environ 5×10^{-3} en valeur relative, en fonction des conditions de mesure. La valeur mesurée de A_e est en accord avec l'incertitude estimée à partir de la courbe d'efficacité du SIR. Pour le ^{222}Rn , une différence relative de 2×10^{-2} est observée entre la mesure et le calcul, parce que la courbe d'efficacité n'est pas directement applicable aux échantillons gazeux.

En avril 2002, les vingt-deux ampoules pour la comparaison de mesures d'activité du ^{65}Zn ont été mesurées dans le SIR. En mai 2002, sept ampoules préparées à partir de la solution non diluée de ^{32}P ayant une activité spécifique d'environ 70 MBq/g, remplies par la PTB d'une solution de plus en plus concentrée (de 1 g à 4,2 g), ont aussi été envoyées pour être mesurées dans le SIR. Après l'achèvement de la comparaison et évaluation de la concentration en activité, ces mesures seront utilisées pour améliorer la détermination des caractéristiques de la réponse de la chambre du SIR au rayonnement de freinage produit par l'émission de rayonnement bêta du ^{32}P .

7.2.3 Courbe d'efficacité du SIR

La courbe d'efficacité gamma du SIR est déterminée par l'ajustement de fonctions aux résultats expérimentaux des radionucléides en solution liquide. Cependant, nous disposons de peu de résultats aux basses énergies, ce qui limite la précision de la courbe ajustée. D'autres difficultés proviennent de ce que la courbe n'est pas directement applicable aux rayonnements gamma d'annihilation ni aux radionucléides sous forme gazeux, dont l'auto-atténuation est différente. L'IRA a simulé la réponse de la chambre d'ionisation du SIR au moyen du code de Monte Carlo GEANT. La simulation semble mieux reproduire les mesures que les fonctions utilisées pour l'ajustement de la courbe d'efficacité, sauf à chaque extrémité du domaine d'énergie (au-dessous de 40 keV et au-dessus de 1,8 MeV). Ce problème est à l'étude.

La simulation de la réponse de la chambre d'ionisation aux rayonnements bêta est aussi en cours à l'IRA. Un programme FORTRAN a été mis au point au BIPM pour l'entrée des données ; ce programme calcule la forme des spectres bêta pour les transitions autorisées et interdites, en prenant en compte les effets Coulomb et d'écran. Le programme, fondé sur les tables de

Behrens et de Jänecke, est comparé à d'autres programmes, en collaboration avec le BNM-LNHB.

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

Un discriminateur incorporant un diviseur de fréquence a été conçu et construit pour traiter le signal de fréquence fourni par la section du temps et donner le rapport des coïncidences triples aux coïncidences doubles à partir d'un signal que l'on peut sélectionner entre 1 Hz et 100 kHz. Un oscilloscope à dix voies a été installé de manière à pouvoir suivre simultanément les signaux rapides et les signaux sélectionnés par poste. Trois analyseurs multicanaux permettent un réglage simultané des différents seuils. De plus, un voltmètre à trois canaux au format NIM™ a été mis au point et est maintenant en usage. La détermination des caractéristiques de ces nouveaux équipements est en cours.

7.2.5 Spectrométrie de rayonnement gamma

En plus du contrôle de la stabilité du spectromètre Ge(Li) au moyen de mesures d'ampoules de ^{60}Co et de ^{137}Cs , nous avons effectué des vérifications des impuretés et des mesures d'activité avec des ampoules de ^{18}F , ^{32}P , ^{131}I , ^{152}Eu et de ^{238}Pu soumises pour les comparaisons.

La linéarité de la chaîne électronique du spectromètre HPGe a été améliorée en construisant une porte linéaire fondée sur un circuit intégré du commerce réalisant la fonction d'interrupteur analogique, sans détériorer la résolution en énergie. Le domaine dynamique reste large, ce qui permet d'effectuer des mesures de 12 keV à 1,85 MeV.

7.3 Publications, conférences et voyages : section des rayonnements ionisants

7.3.1 Publications extérieures

1. Allisy-Roberts P.J. (ed.), *Medical and Dental Guidance Notes – A good practice guide on all aspects of ionising radiation protection in the clinical environment*, York, Institute of Physical Sciences in Medicine, 2002, 225 p.
2. Michotte C., Efficiency curve of the ionization chamber of the SIR, *Appl. Rad. Isotopes*, 2002, **56**, 15-20.

3. Ratel G., International comparison of activity measurements of a solution of ^{75}Se , *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, 2002, **A481**, 241-252.
4. Woods M.J., Woods D.H., Woods S.A., Husband L.J., Jerome S.M., Michotte C., Ratel G. *et al.*, Standardization and decay data of ^{237}Np , *Appl. Rad. Isotopes*, 2002, **56**, 415-420.

7.3.2 Rapports BIPM

5. Allisy-Roberts P.J., Burns D.T., Gábriš F., Dobrovodský J., Comparison of the standards of air kerma of the SMU Slovakia and the BIPM for ^{60}Co γ rays, *Rapport BIPM-2002/04*, 2002, 9 p.
6. Allisy-Roberts P.J., Burns D.T., Kessler C., Ivanov R.N., Comparison of the standards of air kerma of the NCM Bulgaria and the BIPM for ^{60}Co γ rays, *Rapport BIPM-2002/03*, 2002, 9 p.
7. Allisy-Roberts P.J., Burns D.T., Kessler C., Spasić-Jokić V., Comparison of the standards of air kerma of the SZMDM Yugoslavia and the BIPM for ^{60}Co γ rays, *Rapport BIPM-2002/01*, 2002, 8 p.
8. Boutillon M., Burns D.T., Moretti C.J., Williams T.T., Comparison of the air-kerma standards of the NPL and the BIPM in the low- and medium-energy x-ray ranges, *Rapport BIPM-2002/08*, 2002, 8 p.
9. Burns D.T., Bueermann L., Kramer H.-M., Lange B., Comparison of the air-kerma standards of the PTB and the BIPM in the low-energy x-ray range, *Rapport BIPM-2001/08*, 2001, 9 p.
10. Burns D.T., Bueermann L., Kramer H.-M., Lange B., Comparison of the air-kerma standards of the PTB and the BIPM in the medium-energy x-ray range, *Rapport BIPM-2002/07*, 2002, 13 p.
11. Burns D.T., Villevalde N.D., Oborin A.V., Yurjatin E.N., Comparison of the air-kerma standards of the VNIIM and the BIPM in the medium-energy x-ray range, *Rapport BIPM-2001/07*, 2001, 11 p.
12. Burns D.T., Villevalde N.D., Oborin A.V., Yurjatin E.N., Comparison of the air-kerma standards of the VNIIM and the BIPM in the low-energy x-ray range, *Rapport BIPM-2002/06*, 2002, 12 p.

7.3.3 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

P.J. Allisy-Roberts s'est rendue à :

- Londres (Royaume-Uni), le 18 juillet 2001 et le 10 janvier 2002, pour le comité de rédaction du *Journal of Radiological Protection* ; le 10 octobre 2001 et le 25 mars 2002, pour l'U.K. Health and Safety Commission Ionizing Radiation Advisory Committee (IRAC) ; et le 11 mars 2002 pour une réunion de l'U.K. Department of Trade and Industry – Measurement Advisory Committee (MAC) ;
- Vienne (Autriche), du 25 février au 1^{er} mars 2002, pour présider le Comité scientifique des laboratoires secondaires de dosimétrie de l'AIEA et de l'OMS et visiter les laboratoires de l'AIEA et du BEV ;
- Bethesda (États-Unis), du 7 au 9 avril 2002, pour le deuxième ICRU Report Committee meeting on measurement quality assurance in radiation dosimetry ;
- Teddington (Royaume-Uni), du 29 avril au 1^{er} mai 2002, pour présider la session d'examen des programmes du NPL dans le domaine des rayonnements ionisants et de l'acoustique du MAC.

D.T. Burns s'est rendu :

- au NRC, Ottawa (Canada), du 1^{er} au 4 octobre 2001, pour un atelier sur l'utilisation du logiciel OMEGA-BEAM pour le transport de rayonnements ;
- à Montréal (Canada), du 10 au 13 octobre 2001, pour présenter un article à l'atelier international sur « Recent developments in accurate radiation dosimetry » à l'université McGill ;
- à Odense (Danemark), du 15 au 19 avril 2002, comme représentant du BIPM à une réunion de la Main commission de l'ICRU.

D.T. Burns, C. Michotte et G. Ratel se sont rendus à Issy-les-Moulineaux (France), du 5 au 7 novembre 2001, à l'Agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE, pour suivre un cours sur le logiciel PENELOPE pour le transport de rayonnements.

C. Kessler s'est rendue à l'OMH (Hongrie), le 18 juin 2002, pour une visite du laboratoire et pour collecter des étalons de transfert du BIPM.

7.4 Activités en liaison avec des organisations extérieures

P.J. Allisy-Roberts est membre du British Committee for Radiation Units. Elle est membre du MAC dans le domaine de l'acoustique et des rayonnements ionisants et membre scientifique de l'IRAC. Elle est membre de l'ICRU Report Committee ; elle représente le BIPM au Comité scientifique des laboratoires secondaires de dosimétrie de l'AIEA, et est membre du Comité de rédaction du *Journal of Radiological Protection* et conseiller de *Physics in Medicine and Biology*.

D.T. Burns représente le BIPM aux réunions de l'ICRU et aux réunions des personnes chargées des relations dans le domaine des rayonnements ionisants et de la radioactivité au sein de l'EUROMET. Il est conseiller de *Physics in Medicine and Biology* et de *Medical Physics*. Il était co-auteur de quatre résumés présentant le code de pratique de l'AIEA (publié en 2001) qui ont été présentés en Afrique du Sud, en Allemagne, aux États-Unis et en Grèce.

G. Ratel représente le BIPM à l'International Committee for Radionuclide Metrology (ICRM).

7.5 Activités liées au travail des Comités consultatifs

P.J. Allisy-Roberts est secrétaire exécutive du CCRI et de ses trois Sections, ainsi que du CCAUV.

Elle est membre, avec D.T. Burns, des groupes de travail de la Section I du CCRI sur les comparaisons clés et sur les facteurs de correction pour le kerma dans l'air pour les chambres à cavité.

G. Ratel est membre des groupes de travail de la Section II du CCRI sur l'extension du SIR aux émetteurs de rayonnement bêta, sur les comparaisons clés, et sur les incertitudes de mesure.

C. Michotte représente le BIPM au Groupe de travail 1 du Comité commun pour les guides en métrologie. Elle en est le rapporteur.

7.6 Visiteurs de la section des rayonnements ionisants

- MM. S. Sepman (VNIIM) et Á. Szörényi (OMH), le 18 octobre 2001.
- MM. J.-L. Picolo et M.-G. Fronlart (BNM-LNHB), le 25 octobre 2001.
- MM. P. Cassette et F. Jaubert (BNM-LNHB), et M. S. Doru (IFIN), le 22 mars 2002.
- MM. P. Cassette et C. Bobin (BNM-LNHB), le 10 avril 2002.
- M. J. Alziro Herz da Jornada (INMETRO), le 25 avril 2002.
- M. Y. Hino (NMIJ/AIST), le 25 juin 2002.

7.7 Stagiaires, chercheurs invités et étudiants

- Mme C. Kessler (CRRD), du 1^{er} septembre 2001 au 31 janvier 2002.
- Mme M.-N. Amiot-Péron, MM. A. De Vismes et C. Bobin (BNM-LNHB), le 15 novembre 2001.
- M. V. Spasić-Jokić (SZMDM), du 19 au 29 novembre 2001.
- MM. Tian Zhongqing, Hu Jiachong et Shao Qing (NIM) du 11 au 20 décembre 2001.
- M. R.N. Ivanov (NCM), du 13 au 31 janvier 2002.
- M. M.A. Sharaf (NIS), du 14 au 28 mars 2002.
- M. W. Tiefenböck (BEV), du 8 au 12 avril 2002.
- M. I. Csete (OMH), du 15 au 19 avril 2002.
- M. Kook Jin Chun (KRISS), le 26 avril 2002.
- M. J.G. Peixoto (IRD-LNMRI), du 13 au 17 mai 2002.
- M. R. Thomas (NPL), du 21 au 31 mai 2002.
- Mlle Z. Msimang (CSIR-NML), du 3 juin au 30 août 2002.
- M. L. Kotler (ARPANSA), les 3, 7 et 14 juin 2002.

8 CHIMIE (R.I. WIELGOSZ)

8.1 Programme de comparaisons d'étalons de référence mesureurs d'ozone (J. Viallon et R.I. Wielgosz)

La collaboration entre le NIST et le BIPM sur les étalons d'ozone se poursuit. Le NIST a terminé la fabrication de deux photomètres étalons de référence pour les mesures d'ozone (SRP 27 et 28) pour le BIPM en janvier 2002. Ces étalons ont été comparés à ceux en service au NIST (SRP 0 et 2) ; ils sont équivalents dans la limite de l'incertitude de mesure des résultats. Cependant, la détermination ultérieure des différences de pression et de température entre les cellules, ainsi que des autres sources éventuelles d'erreurs systématiques, sera entreprise dans le cadre d'un programme expérimental qui commencera plus tard cette année. La PTB a prêté l'étalon SRP 19 au BIPM pour une période de deux ans. La différence entre l'étalon SRP 19 et les autres étalons constatée dans le projet 414 (ozone) de l'EUROMET a été éliminée, en redonnant à l'étalon sa configuration d'origine pour les mesures de pression. Après l'installation des étalons SRP 27 et 28 au BIPM par J. Norris (NIST) en avril 2002, nous avons évalué l'équivalence entre ces trois étalons. Des recherches sur la stabilité des instruments utilisés comme instruments voyageurs seront effectuées ultérieurement.

Dans le cadre de la préparation de la comparaison pilote CCQM-P28 (ozone, niveau ambiant), dont le BIPM est le laboratoire pilote, un questionnaire a été mis au point pour déterminer le niveau d'activité et les équipements des pays dans le domaine des étalons primaires d'ozone ; il sera diffusé aux laboratoires nationaux.

8.2 Équipements pour les étalons primaires de dioxyde d'azote (M. Esler et R.I. Wielgosz)

Des équipements primaires pour la préparation dynamique d'étalons gazeux de dioxyde d'azote sont en cours d'installation. Une balance à suspension magnétique a été installée pour mesurer la perte de masse en dioxyde d'azote des tubes de perméation. La stabilité de la balance est à l'étude. Un système « molbloc » sera utilisé pour fournir une mesure exacte du flux de gaz dans le système. Une étude de faisabilité sur l'utilisation de cellules utilisant la méthode de spectroscopie infrarouge par transformée de Fourier (FT-IR) à

passages multiples servant à déterminer les niveaux d'impuretés provenant du système de perméation est en cours.

Une fois prêt, ce système servira de référence primaire pour les mesures de fraction molaire en dioxyde d'azote, référence nécessaire pour le titrage en phase gazeuse.

8.3 Équipements pour le titrage en phase gazeuse

(M. Esler et R.I. Wielgosz)

Des équipements pour le titrage en phase gazeuse ont été mis en place pour servir de deuxième méthode primaire de mesure de concentration d'ozone. Le système de départ utilisera la méthode de dilution dynamique contrôlée par mesure de débit massique appliquée à des étalons de gaz de monoxyde d'azote à haute concentration. Les variations de la concentration en oxyde d'azote et en dioxyde d'azote seront contrôlées par un analyseur de chimioluminescence, et elles seront comparées à la perte d'ozone mesurée par absorption de rayonnement ultraviolet. La détermination de la réaction de titrage pour la chimie en phase gazeuse est envisagée.

8.4 Équipements pour les comparaisons d'étalons d'oxyde d'azote

(M. Esler et R.I. Wielgosz)

Des équipements pour la comparaison d'étalons de monoxyde d'azote d'une valeur nominale de 50 $\mu\text{mol/mol}$ en fraction molaire sont en cours de mise au point. Ils seront employés pour la comparaison de concentration d'étalons de monoxyde d'azote utilisés pour le titrage en phase gazeuse. Un analyseur fonctionnant par absorption d'ultraviolets sera utilisé pour faire des mesures comparatives, et un système d'auto-échantillonnage y sera intégré vers la fin de 2002.

8.5 Publications, conférences et voyages : section de chimie

8.5.1 Publications extérieures

1. Wielgosz R.I., An international programme for metrology in chemistry, *VAM Bulletin*, 2001, **25**, 3.
2. Wielgosz R.I., An international programme for metrology in chemistry, *Proc. Int. Metrol. Conf.*, Bucharest, 2001, **2**, 301-306.

3. Wielgosz R.I., International Comparability of Measurements, *Eurachem Newsletter*, Winter 2001/2002, n° 21, 4-5.

8.5.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

R.I. Wielgosz s'est rendu :

- à l'INM, Bucarest (Roumanie), du 18 au 20 septembre 2001, pour présenter un exposé intitulé « An international programme for metrology », à l'International Metrology Conference ;
- à la PTB, Braunschweig (Allemagne), les 24 et 25 septembre 2001, pour présenter un exposé intitulé « The role of CCQM and the MRA » au 166^e PTB Seminar on the Importance of Traceable pH Measurements in Science and Technology ;
- au LGC, Londres (Royaume-Uni), les 15 et 16 octobre 2001, pour des discussions sur le programme futur d'analyse organique au BIPM, et participer à un atelier du VAM sur la traçabilité des mesures chimiques ;
- à l'IRMM, Geel (Belgique), les 22 et 23 octobre 2001, pour des réunions des Groupes de travail du CCQM sur l'analyse organique et l'analyse électrochimique ;
- à Potters Bar (Royaume-Uni), le 25 janvier 2002, pour visiter le NIBSC pour des discussions sur la traçabilité en médecine de laboratoire et sur les implications de la directive des communautés européennes sur les appareils de diagnostic in-vitro (IVD) ;
- au NMI, Delft (Pays-Bas), du 28 janvier au 1^{er} février 2002, pour participer au Groupe de travail du CCQM sur l'analyse de gaz, au 2^e Gas Analysis Symposium and Exhibition organisé par le comité technique 158 de l'ISO à Maastricht, et pour présenter un poster sur « International Comparability of Gas Standards »;
- à Prague (Rép. tchèque), du 6 au 8 février 2002, pour présenter le programme du BIPM sur la métrologie des gaz au Metchem Working Group on Gas Analysis de l'EUROMET et à la session plénière ;
- au NIST, Gaithersburg (États-Unis), du 4 au 8 mars 2002, pour évaluer les performances de deux photomètres étalons de référence mis au point pour le BIPM, et discuter de collaborations futures ;
- à la Nouvelle-Orléans (Louisiane, États-Unis), du 18 au 21 mars 2002, pour participer à PITTCO 2002, invité par le NIST sur leur stand

dressé lors de la conférence, afin de présenter la base de données du BIPM sur les comparaisons clés ;

- à Varsovie (Pologne), du 17 au 19 juin 2002, pour présenter le programme de chimie du CCQM et du BIPM au GUM, et assister à la conférence « Towards an integrated infrastructure for measurements ».

M. Esler s'est rendu au BNM-LNE, Paris (France), le 5 mars 2002, pour des discussions sur la métrologie des gaz avec MM. A. Marschal et J. Barbe, et Mme T. Mace.

J. Viallon s'est rendue :

- au laboratoire de chimie physique, université de Reims (France), le 19 septembre 2001, pour des discussions avec M. J. Malicet sur les mesures de sections efficaces de l'ozone ;
- à Harrogate (Royaume-Uni), du 6 au 8 novembre 2001, pour assister à la session sur « Mass Spectrometry for Life Science » de la conférence NMC-BEMC ;
- au BNM-LNE, Paris (France), du 12 au 16 novembre 2001, pour la comparaison des photomètres d'ozone mis au point par le KRISS et conservés par le BNM-LNE, et du 11 au 13 décembre 2001, pour assister à un cours « Estimation et maîtrise des incertitudes de mesure » ;
- au METAS, Bern (Suisse), du 4 au 6 décembre 2001, pour la mise à niveau du photomètre étalon de référence utilisé par le METAS ;
- au NMI, Delft (Pays-Bas), du 28 janvier 2001 au 1^{er} février 2002, pour participer au Groupe de travail du CCQM sur l'analyse de gaz et au 2^e Gas Analysis Symposium and Exhibition organisé par le comité technique 158 de l'ISO à Maastricht ;
- au NIST, Gaithersburg (États-Unis), du 10 février au 9 mars 2002, invitée à évaluer les performances de deux photomètres étalons de référence fabriqués pour le BIPM.

8.6 Activités en liaison avec des organisations extérieures

Le BIPM a pris des contacts avec l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Mme L. Jalkanen (OMM) a présenté au Groupe de travail sur l'analyse des gaz et à l'atelier sur la traçabilité du CCQM le programme de surveillance atmosphérique du Globe (GAW) de l'OMM.

R.I. Wielgosz a participé activement à des réunions hébergées par le BIPM qui ont abouti à la création du Comité commun pour la traçabilité en

médecine de laboratoire (JCTLM). Il est membre du comité de rédaction d'*Accreditation and Quality Assurance*.

8.7 Activités liées au travail des Comités consultatifs

R.I. Wielgosz est secrétaire exécutif du CCQM.

Un atelier du CCQM sur la traçabilité a eu lieu les 16 et 17 avril 2002 au BIPM ; les comptes rendus ont été distribués aux participants.

Le BIPM a aidé activement les laboratoires nationaux qui participent au MRA. Il a accueilli les réunions sur l'examen des aptitudes en matière de mesures et d'étalonnage dans le domaine de la quantité de matière au niveau inter-régional, en août 2001 et avril 2002, et y a participé.

8.8 Visiteurs de la section de chimie

- M. W. Bell (NPL), le 5 juillet 2001.
- M. J. Orphal (CNRS Orsay), le 27 septembre 2001.
- M. J.-C. Woo (KRISS), le 16 novembre 2001.
- M. J. Alziro Herz da Jornada (INMETRO), le 24 avril 2002.
- MM. L.A. Konopelko et I.B. Nekhilioudov (VNIIM), le 2 mai 2002.
- M. M. Sassi (IMGC-CNR), le 16 mai 2002.

8.9 Chercheur invité

- M. J. Norris (NIST), du 22 au 26 avril 2002.

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 ; G. Petitgand)

L'annexe B de la base de données du BIPM sur les comparaisons clés (KCDB) recouvre maintenant environ 450 comparaisons clés et supplémentaires réalisées sous les auspices du Comité international et des organisations régionales de métrologie. Les résultats de 36 d'entre elles étaient publiés par l'intermédiaire de la KCDB en juin 2002. Pour la première fois, les résultats d'une comparaison clé régionale (EUROMET.M.P-K2, dans le domaine des hautes pressions) ont été reliés à ceux de la comparaison clé du Comité consultatif correspondante (CCM.P-K1.c) ; le jeu complet des degrés d'équivalence obtenus a été publié par l'intermédiaire de la KCDB le 26 avril 2002. Depuis novembre 2001, de nouveaux résultats approuvés par les Comités consultatifs sont communiqués au BIPM chaque semaine pour publication, une cadence que nous avons bien du mal à suivre. Le résumé électronique des résultats, déduit du texte du rapport final approuvé d'une comparaison clé et présenté selon le format EXCEL prédéfini, n'est pas toujours fourni, et il faut alors échanger un certain nombre de messages ainsi qu'effectuer des vérifications. Ce travail peut s'étaler sur quelques semaines dans certains cas.

L'annexe C contenait quelque 13 000 aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages (CMCs) au début du mois de juin 2002. Elle couvrait déjà les domaines des longueurs, de l'électricité et du magnétisme, de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations, de la photométrie et de la radiométrie, et des mélanges de gaz ; elle a été ouverte à la chimie générale le 12 mars 2002, aux masses et grandeurs apparentées le 27 mars 2002, ainsi qu'aux rayonnements ionisants le 26 avril 2002. 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 et les rayonnements ionisants, on a mis au point des systèmes de recherche plus appropriés, qui utilisent des mots clés.

En plus de la publication des données, de gros efforts sont consacrés à l'amélioration de la structure des bases de données qui sous-tendent la KCDB et du système de programmation du Web, principalement pour répondre aux demandes des utilisateurs. Nous travaillons ces points purement

informatiques avec une société internationale dont le siège est situé en France. Leurs conseils et réalisations permettent de tirer profit des meilleures techniques disponibles et d'obtenir une programmation optimisée. Il n'en demeure pas moins que le BIPM se charge de la conception de toutes les modifications apportées.

Suite à plusieurs demandes exprimées lors de réunions du Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM (JCRB) ou de Comités consultatifs, nous cherchons à faire de la publicité pour la KCDB aussi souvent que possible. Par exemple, nous avons publié des articles dans plusieurs circulaires de Newsletters, présenté des posters dans certains congrès et distribué largement la plaquette de la KCDB. Nous avons également fait des démonstrations de la KCDB, en direct sur le Web, installés sur le stand du NIST dressé lors de la conférence PITTCON 2002, conférence qui rassemble quelque 25 000 experts internationaux dans le domaine de la chimie. Nous observons en retour un accroissement significatif et continu du nombre de visites que le site Web de la KCDB reçoit ; il était d'environ 2500 pour le mois de mai 2002.

9.2 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites)

C. Thomas s'est rendue à :

- La Nouvelle-Orléans (Louisiane, États-Unis), du 18 au 21 mars 2002, invitée par le NIST sur leur stand dressé lors de la conférence PITTCON 2002, afin de présenter la base de données du BIPM sur les comparaisons clés ;
- Sèvres (France), le 11 avril 2002, pour faire un cours sur les unités SI au lycée international, à l'occasion d'un échange de lycéens entre la France et la Slovaquie.

9.3 Activités liées au travail des Comités consultatifs

C. Thomas a assisté à :

- la 21^e session du CCT, du 12 au 14 septembre 2001 ;
- la réunion du Groupe de travail du CCL sur la métrologie dimensionnelle, les 17 et 18 septembre 2001 ;
- la 10^e session du CCL, les 19 et 20 septembre 2001 ;
- la 2^e session du CCAUV, les 4 et 5 octobre 2001 ;

- la 7^e réunion du JCRB, les 8 et 9 octobre 2001 ;
- la réunion du Groupe de travail sur la viscosité, le 26 octobre 2001 ;
- la réunion des représentants des organisations régionales de métrologie dans le domaine de la quantité de matière, le 12 avril 2002 ;
- les réunions des Groupes de travail du CCQM sur l'analyse inorganique et l'analyse électrochimique, les 14 et 15 avril 2002 ;
- la 8^e session du CCQM, les 18 et 19 avril 2002 ;
- les réunions des Groupes de travail du CCM sur la masse volumique et les pressions, les 21 et 22 avril 2002 ;
- la réunion des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie, les 22 et 23 avril 2002 ;
- la 8^e session du CCM, les 23 et 24 avril 2002.

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

9.4 Visiteurs et stagiaires

- Mme S. Maniguet, du 14 janvier au 31 mars 2002.
- M. Y. Kustikov (VNIIM), le 17 avril 2002.
- M. G. Mattingly (NIST), le 22 mai 2002.

10 INFORMATIQUE ET QUALITÉ (R. KÖHLER*)

10.1 Informatique (R. Köhler, L. Le Mée, G. Petitgand)

Le nombre de consultations sur le site Internet du BIPM continue à augmenter ; on compte en moyenne 1350 connexions par jour sur le site du BIPM. Nous avons doublé la vitesse de connexion à notre serveur pour permettre un accès rapide au nombre croissant d'utilisateurs externes. Des études ont été faites pour savoir comment faciliter l'administration et la maintenance du site tout en appliquant les principes de déroulement des opérations requis par le système qualité. Cette nouvelle architecture sera

* Depuis le 1^{er} septembre 2001.

bientôt mise en place ; elle sera mise en service progressivement avant la fin de 2002. Le moteur de recherche sur la métrologie est lui aussi fréquemment utilisé, et nous avons reçu environ 15 000 demandes depuis septembre 2001.

Un système de secours, doublant l'équipement nécessaire pour publier notre site Web et pour la base de données du BIPM sur les comparaisons clés a été mis en place. Ce second système est automatiquement synchronisé avec notre système principal et minimise le temps d'arrêt de nos services au cas où notre serveur principal souffrirait d'une interruption. Un site à accès restreint a aussi été mis en place pour permettre aux organisations régionales de métrologie de se tenir informées de l'état d'avancement de l'examen de leurs aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages. Les représentants des organisations régionales de métrologie au JCRB peuvent voter de manière électronique l'approbation des fichiers par l'intermédiaire de ce site interactif.

D'autres améliorations ont été apportées à ce service :

- Un système de défense plus efficace contre les virus a été installé ; deux systèmes de logiciels de protection différents éliminent automatiquement certains types de fichiers pouvant se révéler suspects.
- Les membres du personnel du BIPM peuvent maintenant avoir accès à leurs e-mails de manière sécurisée à partir de n'importe quel ordinateur connecté à l'Internet.
- Les participants aux réunions qui se tiennent au Pavillon de Mail ont maintenant accès à l'Internet à partir de leur propre ordinateur. Dans un proche avenir, des terminaux seront installés pour ceux qui ne voyagent pas avec un ordinateur portable. Entre-temps, la cellule informatique a mis quelques ordinateurs à la disposition des délégués à proximité de la salle de réunion.

De plus, la cellule informatique aide à l'acquisition, l'installation, l'administration et la maintenance d'environ 150 ordinateurs personnels et portables dans les bureaux et les laboratoires. Par ailleurs, une étude a été faite sur l'introduction de la vidéo-conférence au BIPM.

10.2 Systèmes qualité (R. Köhler)

Suite à la décision du directeur d'établir un système qualité au BIPM, un document a été soumis au bureau du Comité proposant une structure qualité. Le travail d'élaboration de la documentation initiale a ensuite débuté. Les premières procédures et formulaires ont été publiés.

Une base de données spécialement conçue pour le recensement des équipements de laboratoire pour la métrologie a été achetée et installée. Un membre du personnel de chaque section scientifique a été nommé coordinateur du système qualité et a reçu une formation à l'utilisation de cette base de données.

10.3 Voyages (conférences, exposés et présentations, visites) : section informatique et qualité

R. Köhler s'est rendu :

- au NPL (Royaume-Uni), le 10 août 2001, pour rencontrer A. Wallard pour des discussions sur l'introduction du système qualité au BIPM, et du 3 au 7 septembre 2001, pour étudier le système qualité du NPL ;
- à Paris (France), le 4 octobre 2001, pour une réunion d'Eurolab sur les systèmes qualité ;
- au BEV (Autriche), les 10 et 11 octobre 2001 et du 20 au 22 février 2002, pour des réunions de l'European QS Forum et de l'Initiation Project ;
- au BNM-LNE (France), du 20 au 23 novembre 2001, pour un cours sur la norme ISO 17025, et du 9 au 11 avril 2002, pour un cours sur l'audit des systèmes qualité selon la norme ISO 17025 ;
- à Rotterdam (Pays-Bas), du 12 au 14 décembre 2001, pour une réunion de l'European QS Forum et de l'Initiation Project ;
- à l'IMGC (Italie), le 11 janvier 2002, pour une réunion du comité directeur du réseau Metronet ;
- au NMI (Pays-Bas), du 15 au 17 mai 2002, pour la première réunion du réseau Metronet ;
- à Prague (Rép. tchèque), du 29 au 31 mai 2002, pour une réunion de l'European QS Forum et de l'Initiation Project.

10.4 Visiteurs de la section informatique et qualité

- Mme B. Rueff, du 24 au 26 septembre 2001.
- Mme J. Brick (NPL), du 21 au 24 mai 2002, pour des discussions sur les systèmes qualité avec différents chefs de section.

11 PUBLICATIONS DU BIPM (P.W. MARTIN)

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

Depuis juillet 2001 ont été publiés :

- *21^e Conférence générale des poids et mesures (1999)*, 2001, 402 p.
- *Procès-verbaux des séances du Comité international des poids et mesures*, 90^e session (2001), 2002, **69**, 159 p.
- *Rapport du directeur sur l'activité et la gestion du Bureau international des poids et mesures* (2001), 2002, **2**, 226 p.
- *Comité consultatif pour la quantité de matière*, 7^e session (2001), 2001, 106 p.
- *Comité consultatif des rayonnements ionisants*, 17^e session (2001), 2002, 238 p.
- *Comité consultatif de photométrie et radiométrie*, 16^e session (2001), 2002, 107 p.
- *Comité consultatif de thermométrie*, 21^e session (2001), 2002, 83 p.
- *Comité consultatif du temps et des fréquences*, 15^e session (2001), 2002, 142 p.
- *Comité consultatif des unités*, 14^e session (2001), 2002, 74 p.

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

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

Le volume 38 de *Metrologia* a été publié en 2001-2002 ; il comprend six numéros normaux. L'année passée nous avons aussi introduit ESPERE, un système Internet sécurisé pour la soumission en ligne de manuscrits. Quand les auteurs soumettent leurs articles au moyen d'ESPERE, nous leur assignons une adresse URL unique auquel seul le rédacteur et les referees ont accès. Ce système s'est montré pratique pour les referees et les auteurs, permettant à ces derniers de garder une trace de l'état d'avancement de leur manuscrit lors de la procédure éditoriale. Nous espérons qu'un nombre important d'auteurs utiliseront cette possibilité quand elle sera mieux connue.

De plus, la base de données de *Metrologia* a fait l'objet d'une amélioration importante avec l'adjonction sur le site Web du BIPM de résumés des articles depuis 1984, ainsi que l'introduction de liens à tous les articles de *Metrologia* figurant dans la bibliographie d'un article donné et aux articles de *Metrologia* faisant référence à cet article.

Une évolution majeure a été l'introduction d'un supplément technique à *Metrologia*, uniquement sous forme électronique, lié à une nouvelle politique éditoriale relative à la publication des rapports des comparaisons clés. Ce système résulte de l'arrangement de reconnaissance mutuelle : il a pour but d'éviter de surcharger *Metrologia* avec les rapports des comparaisons clés. Le *Technical Supplement* les publie sous forme d'une page comportant le titre et un résumé, ainsi qu'un lien au rapport final de la comparaison, lui-même stocké dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés et proposé à partir de son site Web. Les rapports des comparaisons pourront toujours être acceptés pour publication dans le journal imprimé, mais seulement s'ils comportent des nouveautés scientifiques ou des innovations.

Cette innovation a été très bien perçue, car *Metrologia* devient ainsi libre de se concentrer sur des articles liés à la métrologie fondamentale. Des informations plus détaillées et la base de données donnant accès à tous les articles de *Metrologia* (et de son *Technical Supplement*) sont disponibles sur notre site web (www.bipm.org/metrologia).

12 RÉUNIONS ET EXPOSÉS AU BIPM

12.1 Réunions

Les réunions suivantes ont eu lieu au BIPM :

- Le CCT s'est réuni du 12 au 14 septembre 2001 ; il a été précédé des réunions de ses groupes de travail les 10 et 11 septembre.
- Le CCL s'est réuni les 19 et 20 septembre 2001 ; il a été précédé des réunions de ses groupes de travail les 17 et 18 septembre.
- Le CCAUV s'est réuni les 4 et 5 octobre 2001.
- Le JCRB s'est réuni les 8 et 9 octobre 2001 et les 5 et 6 mars 2002.
- Le Groupe de travail sur la viscosité s'est réuni le 26 octobre 2001.
- Le JCTLM s'est réuni le 19 novembre 2001 et du 9 au 11 juin 2002.

- Le Groupe de travail 1 (GUM) du Comité commun pour les guides en métrologie (JCGM) s'est réuni du 26 au 29 novembre 2001 et les 29 et 30 avril 2002, et le Groupe de travail 2 (VIM) les 28 et 29 novembre 2001 et les 2 et 3 mai 2002.
- Le Groupe de travail du CCEM sur les comparaisons clés s'est réuni les 3 et 4 décembre 2001.
- Le Groupe de travail commun à l'OIML, au CIPM et à l'ILAC s'est réuni le 27 février 2002.
- L'International Symposium on TSA a eu lieu les 18 et 19 mars 2002.
- Le CCQM s'est réuni du 15 au 19 avril 2002 ; il a été précédé des réunions de ses groupes de travail du 12 au 14 avril.
- La réunion des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie s'est tenue les 22 et 23 avril 2002.
- Le CCM s'est réuni les 23 et 24 mai 2002 ; il a été précédé des réunions de ses groupes de travail les 21 et 22 mai.

12.2 Exposés

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

- W. Bell (NPL, Royaume-Uni) : Infrared spectroscopy at the NPL – Environmental measurements and their links to metrology, le 5 juillet 2001.
- J. Orphal (CNRS, France) : Spectroscopic needs for UV-visible remote-sensing of the atmosphere, le 27 septembre 2001.
- I. Lira (Université catholique du Chili) : On the Bayesian Evaluation of the Measurement Uncertainty, le 17 janvier 2002.
- R. Blatt (Inst. Experimentalphysik, université d'Innsbruck, Autriche) : Quantum optics and precision measurements using trapped ions, le 20 février 2002.
- W. Klepczynski (États-Unis) : Satellite Based Augmentations System (SBAS), the possibilities for time transfer and time distribution, le 4 avril 2002.
- J. Brick (NPL, Royaume-Uni) : Quality system, le 23 mai 2002.

13 CERTIFICATS ET NOTES D'ÉTUDE

Du 1^{er} juillet 2001 au 30 juin 2002, 116 Certificats et 9 Notes d'étude ont été délivrés.

13.1 Certificats

2001

N ^{os}		
20.	Zener-diode voltage standard, No. 648 500 5*	Czech Metrological Institute (CMI), Brno, Czech Rep.
21.	Ionization chamber, PTW 23344-089	Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI), Rio de Janeiro, Brazil.
22.	Ionization chamber, PTW 23342-1128	International Atomic Energy Agency (IAEA).
23.	Ionization chamber, NE 2561-265	Id.
24.	Ionization chamber, NE 2561-321	Id.
25.	Ionization chamber, LS 01-115	Id.
26.	1 Ω resistance standard, No. 76124*	National Office of Measures (OMH), Budapest, Hungary.
27.	1 Ω resistance standard, No. 470419*	Id.
28.	10 000 Ω resistance standard, No. 115021*	Id.
29.	1 Ω resistance standard, No. 1758733*	Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), Gebze-Kocaeli, Turkey.
30.	1 Ω resistance standard, No. 1616936*	Id.

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

N ^{os}		
31.	100 Ω resistance standard, No. 270167	Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), Gebze-Kocaeli, Turkey.
32.	100 Ω resistance standard, No. 270168	Id.
33.	10 000 Ω resistance standard, No. K 201 12 97 30104	Id.
34.	10 000 Ω resistance standard, No. J 204 11 91 30104*	Id.
35.	10 000 Ω resistance standard, No. K 201 09 93 30104*	Czech Metrological Institute (CMI), Brno, Czech Rep.
36.	1 Ω resistance standard, No. 274 977	Hellenic Institute of Metrol- ogy (EIM), Sindos, Greece.
37.	100 Ω resistance standard, No. 275 022	Id.
38.	10 000 Ω resistance standard, No. 274 916	Id.
39.	1 Ω resistance standard, No. 161 131 2*	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), Vienna, Austria.
40.	1 Ω resistance standard, No. 191 532 2	Id.
41.	10 000 Ω resistance standard, No. 178 481 5*	Id.
42.	Ionization chamber, A4-119	Swedish Radiation Protection Institute (SRPI), Stockholm, Sweden.
43.	Ionization chamber, A4-231	Id.
44.	Helium-neon laser at 633 nm, No. 146	École et Observatoire de Physique du Globe (EOST), Strasbourg, France.
45.	Helium-neon laser at 633 nm, No. 148	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), Vienna, Austria.

N ^{os}		
46.	Helium-neon laser at 633 nm, No. 102	National Institute of Standards and Technology (NIST), Boulder, United States.
47.	Helium-neon laser at 633 nm, No. 130	Geodetic Survey Division of Canada (GSD), Ottawa, Canada.
48.	Helium-neon laser at 633 nm, No. 160	Id.
49.	Helium-neon laser at 633 nm, No. 176	Instituto Geográfico Nacional (IGN), Madrid, Spain.
50.	Helium-neon laser at 633 nm, No. 136	Royal Observatory of Belgium (ORB), Brussels, Belgium.
51.	Helium-neon laser at 633 nm, No. 159	Swiss Federal Office of Metrology and Accreditation (METAS), Wabern, Switzerland.
52.	Helium-neon laser at 633 nm, No. 164	Institut für Angewandte Geodäsie (IAG), Graz, Germany.
53.	Helium-neon laser at 633 nm, No. 158	Id.
54.	Ionization chamber, NE 2571-3108	Hellenic Ionizing Radiation Calibration Laboratory, Athens, Greece.
55.	Prototype de masse n° 21*	Mexique.
56.	1 kg mass standard in stainless steel, LPN-00-02*	Centro Nacional de Metrología (CENAM), Querétaro, Mexico.
57.	1 kg mass standard in stainless steel, LPN-00-07	Id.
58.	Prototype de masse n° 23*	Finlande.
59.	Prototype de masse n° 24*	Espagne.
60.	Étalon de force électromotrice à diode de Zener, n° 5 740 201*	Service de la métrologie belge (SMB), Bruxelles, Belgique.
61.	Prototype de masse n° 48*	Danemark.

N ^{os}		
62.	Étalon de capacité de 10 pF, n° 01149-00021*	Ministère des Affaires économiques, Service de la métrologie belge (SMB), Bruxelles, Belgique.
63.	Étalon de capacité de 10 pF, n° 01150-00021	Id.
64.	Étalon de capacité de 100 pF, n° 01061-00021*	Id.
65.	Étalon de capacité de 100 pF, n° 01075-00021*	Id.
66.	10 pF capacitance standard, No. 01076-00025	Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), Gebze-Kocaeli, Turkey.
67.	10 pF capacitance standard, No. 01077-00025	Id.
68.	10 pF capacitance standard, No. 01078-00025	Id.
69.	10 pF capacitance standard, No. 01079-00025	Id.
70.	100 pF capacitance standard, No. 01196-00044	Id.
71.	100 pF capacitance standard, No. 01197-00044	Id.
72.	100 pF capacitance standard, No. 01198-00044	Id.
73.	Helium-neon laser at 633 nm, No. 113	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), Frank- furt am Main, Germany
74.	Helium-neon laser at 633 nm, No. 129	Id.
75.	Helium-neon laser at 633 nm, No. 137	Instituto di Metrologia G. Colonnetti (IMGC), Turin, Italy.
76.	Three luminous flux standards (2800 K), Nos. 246 A*, 250 D*, 250 E*	SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut AB, Borås, Sweden.

N ^{os}		
77.	Four luminous flux standards (2650 K), Nos. P120, P122, P169, P225	Singapore Productivity and Standards Board – National Measurement Centre (PSB), Singapore.
78.	Helium-neon laser at 633 nm, No. 180	National Metrology Institute of Japan (NMIJ/AIST), Tsukuba, Japan.
79.	Étalon de résistance de 1 Ω , n° 1816196*.....	Service de la métrologie belge (SMB), Bruxelles, Belgique.
80.	Étalon de résistance de 1 Ω , n° 1870791*	Id.
81.	Étalon de résistance de 1 Ω , n° S-64174*	Id.
82.	Étalon de résistance de 10 000 Ω , n° 43021*	Id.
83.	Étalon de résistance de 10 000 Ω , n° 43024*	Id.
84.	Prototype de masse n° 74*	Canada.
85.	Ionization chamber in medium-energy x-rays, ND 1006-8508	Federal Bureau of Precious Metals and Measurements (SZMDM), Beograd, Yugoslavia.
86.	Ionization chamber in ⁶⁰ Co gamma rays, ND 1006-8508.....	Id.
87.	Helium-neon laser at 633 nm, No. 116.....	Centro Español de Metrolo- gía (CEM), Madrid, Spain.
88.	Helium-neon laser at 633 nm, No. 107	Id.
89.	Helium-neon laser at 633 nm, No. 132	National Physical Laboratory, (NPL), Teddington, United Kingdom.
90.	10 000 Ω resistance standard, No. 43007*	Instituto Nacional de Metro- logia, Normalização e Qualida- de Industrial (INMETRO), Rio de Janeiro, Brazil.

N ^{os}		
91.	1 Ω resistance standard, No. 1 883 427*	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), Rio de Janeiro, Brazil.
92.	1 Ω resistance standard, No. 1 711 458*	Id.
93.	Three luminous intensity standards (2800K), Nos. 650-3472*, 655*, 666-3473*	SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut AB, Borås, Sweden.
94.	Three luminous intensity standards (2800 K), Nos. A613*, A615*, A616*	Singapore Productivity and Standards Board – National Measurement Centre (PSB), Singapore.
95.	Colour temperature standard, No. A613*	Id.

2002

N ^{os}		
1.	1 kg mass standard in stainless steel, No. 85380	Singapore Productivity and Standards Board (PSB), Singapore.
2.	Ionization chamber in ⁶⁰ Co and ¹³⁷ Cs gamma rays, ND 1001-7814	National Centre of Metrology (NCM), Sofia, Bulgaria.
3.	Ionization chamber in x-rays, ND 1001-7814	Id.
4.	Ionization chamber, ND 1002-7814	Id.
5.	Ionization chamber, ND 1000-7711	Id.
6.	Étalon de force électromotrice à diode de Zener, n° 5 940 003*	Institut national de métrologie (INM), Bucarest, Roumanie.
7.	Étalon de résistance de 1 Ω , n° 17 103*	Id.
8.	Étalon de résistance de 1 Ω , n° 17 112*	Id.

N ^{os}		
9.	Étalon de résistance de 10 000 Ω , n° 5 885 009*	Institut national de métrologie (INM), Bucarest, Roumanie.
10.	Étalon de résistance de 10 000 Ω , n° 5 885 010*	Id.
11.	1 kg mass standard in stainless steel, No. 8	National Measurement Laboratory (CSIR-NML), Pretoria, South Africa.
12.	Prototype de masse 58*	Égypte.
13.	Étalon de force électromotrice à diode de Zener, n° 582 5005*	National Institute for Standards (NIS), Le Caire, Égypte.
14.	Ionization chamber in medium-energy x-rays, NE 2561-229	Id.
15.	Ionization chamber in medium-energy x-rays, NE 2571-1262	Id.
16.	Ionization chamber in ⁶⁰ Co gamma rays, NE 2561-229	Id.
17.	Ionization chamber in ⁶⁰ Co gamma rays, NE 2571-1262	Id.
18.	Ionization chamber, PTW 23343-2862	Id.
19.	Five luminous flux standards (2800 K), Nos. 21*, 22*, 23*, 24*, and 25 *	Ministère des Affaires Économiques, Service d'Étalonnage, Brussels, Belgium.
20.	Four luminous flux standards (2800 K), Nos. 30*, 33*, 36* and 37*	Id.
21.	Ionization chamber, NE 2561-82	Korean Food and Drug Administration (KFDA), Seoul, Rep. of Korea.

N ^{os}		
22.	Ionization chamber, No. 346	Korean Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, Rep. of Korea.
23.	Ionization chamber, NE 2571-261	Id.
24.	Ionization chamber in ⁶⁰ Co gamma rays, NE 2561-264	Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI), Rio de Janeiro, Brazil.
25.	Ionization chamber in medium-energy x-rays, NE 2561-264	Id.
26.	Ionization chamber, Exradin A2-157	Id.
27.	Ionization chamber, Radcal 10X5-6M-8468	Id.
28.	10 000 Ω resistance standard, No. J 206 069 130 104*	Danish Institute of Fundamental Metrology (DFM), Lyngby, Denmark.
29.	Ionization chamber, NE 2561-84	Országos Mérésügyi Hivatal (OMH), Budapest, Hungary.
30.	Ionization chamber in ⁶⁰ Co gamma rays, NE 2611A-133	Centro Regional de Referencia para la Dosimetría (CRRD), Buenos Aires, Argentina.
31.	Ionization chamber in medium-energy x-rays, NE 2611A-133	Id.
32.	Ionization chamber in ⁶⁰ Co gamma rays, NE 2571-2394	Id.
33.	Ionization chamber in medium-energy x-rays, NE 2571-2394	Id.

N ^{os}		
34.	Six luminous intensity standards (2800 K), Nos. 195/473*, 196/474*, 197/475*, 198/476*, 91/1 and 91/3	Biroul Roman de Metrologie Legala – National Institute of Metrology (BRML-INM), Bucharest, Romania.
35.	Seven luminous flux standards (2800 K), Nos. 2/01, 4/01, 1/864*, 2/865*, LP8888*, L106 and L107	Id.
36.	Three colour temperature standards, Nos. 203/501, 204/505* and 206/507*	Id.
37.	Seven luminous intensity standards (2800 K), Nos. 40G-01*, 40G-02*, 40G-04, 41G-01*, 41G-02*, 41G-03 and 41G-04	Instituto Nacional de Metrologia, Normalizaçao e Qualidade Industrial (INMETRO), Rio de Janeiro, Brazil.
38.	Six luminous flux standards (2800 K), Nos. P134*, P135*, P137*, P142*, P143* and P144*	Federal Bureau of Measures and Precious Metals (SZMDM), Beograd, Yugoslavia.
39.	Four luminous intensity standards (2800 K), Nos. 7HA78*, 7HB78*, 7HC78* and 7GW78*	Id.
40.	Three luminous intensity standards (2800 K), Nos. 1/1*, 1/2* and 1/3*	Id.

13.2 Notes d'étude

2001

N ^{os}		
3.	Two 100 Ω resistance standards, No. 01693, No. 02593	D.I. Mendelejev Institute for Metrology (VNIIM), St Petersburg, Russian Fed.

N ^{os}		
4.	Four 1 kg mass standards in stainless steel, E4, E5, E6, E7	Slovak Institute of Metrology (SMU), Bratislava, Slovakia.
5.	Laser à hélium-néon de longueur d'onde 633 nm, n° 118	École et Observatoire de physique du Globe (EOST), Strasbourg, France.
6.	Laser à hélium-néon de longueur d'onde 633 nm, A10	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), Francfort, Allemagne.
7.	Laser à hélium-néon de longueur d'onde 633 nm, n° 18	Finnish Geodetic Institute (FGI), Masala, Finlande.
8.	Laser à hélium-néon de longueur d'onde 633 nm, n° 19	Id.

2002

N ^{os}		
1.	Water triple-point cell, No. 0590	Instituto Nacional de Metro- logia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), Rio de Janeiro, Brazil.
2.	Seven luminous intensity standards (2856 K), Nos. 40G-01, 40G-02, 40G-04, 41G-01, 41G-02, 41G-03, 41G-04 .	Id.
3.	Ten luminous intensity standards, (2042 K) Nos. 101, 102, 103, 104, 105, (2353 K) Nos. 121, 122, 123, 124, 125	Ministère des Affaires Économiques, Service d'Étalonnage, Brussels, Belgium.

14 GESTION DU BIPM

14.1 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 2001.

14.1.1 Compte I : fonds ordinaires*

Actif au 1 ^{er} janvier 2001			6 197 805,85
Recettes			
Recettes budgétaires			10 656 529,04
Taxes sur les achats remboursées			487 603,81
Réévaluation de l'actif au 31 décembre 2001			86 582,37
Total des recettes			11 230 715,22
Dépenses			
Dépenses budgétaires			8 687 907,53
Dépenses pour l'installation des laboratoires de métrologie en chimie**			297 754,46
Transfert exceptionnel au Compte II. — Caisse de retraite			1 000 000,00
Différences de change			4 288,07
Taxes sur les achats remboursables			589 504,92
Total des dépenses			10 579 454,98
Actif au 31 décembre 2001			6 849 066,09
Détail des recettes budgétaires			
Versement de contributions :			
Au titre de l'exercice 2001	6 490 586,26	} 9 578 512,49	} 10 022 808,30
Au titre de l'exercice 2000	2 037 147,71		
Au titre de l'exercice 1999	737 229,44		
Au titre de l'exercice 1998 et antérieurs	132 336,98		
Au titre de l'exercice 2002	181 212,10		
Prélèvement sur le compte « Remboursement aux États »	444 295,81		
Versement de souscriptions :			
Au titre de l'exercice 2002	8 828,00	} 30 506,32	
Au titre de l'exercice 2001	17 394,00		
Au titre de l'exercice 2000	4 284,32		
Intérêts des fonds			449 235,06
Abonnements à <i>Metrologia</i>			126 556,57
Recettes diverses			
• cession de prototypes (kg)		0,00	} 27 422,79
• divers		27 422,79	
Total des recettes			10 656 529,04

* Depuis l'exercice 2001, conformément à la Résolution 13 de la 21^e Conférence générale, la monnaie de compte du BIPM est l'euro.

** Pour mémoire, les dépenses pour l'installation des laboratoires de métrologie en chimie se sont élevées en 2000 à 113 779,30 euros.

Versement des contributions. — Les versements de contributions effectués au cours de l'année 2001 s'élèvent à 9 578 512,49 euros, dont 6 490 586,26 euros au titre de l'exercice 2001, 181 212,10 euros au titre de l'exercice 2002 et 2 906 714,13 euros au titre des exercices antérieurs.

Dépenses du Compte I. — Les dépenses budgétaires en 2001 se sont élevées à 8 687 907,53 euros pour un budget voté s'élevant à 9 318 352 euros.

Détail des dépenses budgétaires

Chapitres	Dépenses de l'exercice	Budget voté	Économies	Dépassements
<i>A. Dépenses de personnel :</i>				
1. Traitements	3 719 867,48	4 048 000	328 132,52	—
2. Allocations familiales et sociales	730 054,76	899 000	168 945,24	—
3. Charges sociales (a)	399 948,19	459 000	59 051,81	—
<i>B. Contribution à la Caisse de retraite (b) :</i>				
	1 195 000,00	1 195 000	—	—
<i>C. Services généraux :</i>				
1. Chauffage, eau, électricité	143 461,33	138 000	—	5 461,33
2. Assurances	30 940,27	27 000	—	3 940,27
3. Publications	121 036,75	114 000	—	7 036,75
4. Frais de bureau	106 094,65	151 000	44 905,35	—
5. Frais de réunions	56 612,84	41 000	—	15 612,84
6. Voyages et transports de matériel	267 754,78	256 000	—	11 754,78
7. Bibliothèque	159 629,97	114 000	—	45 629,97
8. Bureau du Comité	33 949,09	28 000	—	5 949,09
<i>D. Dépenses de laboratoires :</i>				
	1 320 452,26	1 459 000	138 547,74	—
<i>E. Dépenses de bâtiments (c) :</i> (travaux d'entretien et de rénovation) :				
	353 004,80	332 000	—	21 004,80
<i>F. Frais divers et imprévus (d) :</i>				
	50 100,36	57 352	7 251,64	—
Totaux	8 687 907,53	9 318 352	746 834,30	116 389,83

(a) Comprenant un virement de 69 236,44 euros au Compte II (Caisse de retraite).

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

(c) Comprenant un virement de 79 540,93 euros du Compte V (Réserve pour les bâtiments).

(d) Comprenant un virement de 1 540,36 euros au Compte IV (Caisse de prêts sociaux).

14.1.2 Compte II : caisse de retraite

Actif au 1 ^{er} janvier 2001	8 679 664,82
Recettes	
Retenues sur les traitements	331 964,12
Virement du Compte I*	1 291 457,93
Transfert exceptionnel du Compte I**	1 000 000,00
Intérêts des fonds	607 827,08
Réévaluation de l'actif au 31 décembre 2001	133 365,15
Total des recettes	3 364 614,28
Dépenses	
Pensions servies	1 496 375,64
Total des dépenses	1 496 375,64
Actif au 31 décembre 2001	10 547 903,46

* Comprenant un virement de 69 236,44 euros provenant des économies réalisées sur l'assurance maladie (*BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1994, **62**, 19).

** Transfert exceptionnel décidé par le Comité international lors de sa 90^e session en octobre 2001.

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

Actif au 1 ^{er} janvier 2001	00,00
Recettes	
Contribution d'entrée de la Grèce et de la Malaisie	89 579,10
Total des recettes	89 579,10
Dépenses	
Dépenses de la section du temps	89 579,10
Total des dépenses	89 579,10
Actif au 31 décembre 2001	0,00

14.1.4 Compte IV : caisse de prêts sociaux

Actif au 1 ^{er} janvier 2001 hors créances	90 174,01
Recettes	
Amortissements partiels des prêts :	
Capital	44 271,57
Intérêts	1 941,06
Virement du Compte I	1 540,36
Intérêts des fonds	5 779,21
Total des recettes	53 532,20
Dépenses	
Prêts consentis en cours d'année	60 900,00
Total des dépenses	60 900,00
Actif au 31 décembre 2001 hors créances	82 806,21
Créances de la caisse de prêts sociaux	
Créances au 1 ^{er} janvier 2001	95 549,28
Créances nouvelles en cours d'année	60 900,00
Amortissements partiels des prêts (capital)	-44 271,57
Créances au 31 décembre 2001	112 177,71
Actif au 31 décembre 2001 créances incluses	194 983,92

14.1.5 Compte V : réserve pour les bâtiments

Actif au 1 ^{er} janvier 2001	1 216 406,49
Recettes	
Intérêts des fonds	33 054,43
Total des recettes	33 054,43
Dépenses	
Dépenses Pavillon du Mail	1 169 919,99
Virement au Compte I	79 540,93
Total des dépenses	1 249 460,92
Actif au 31 décembre 2001	00,00

14.1.6 Compte VI : Metrologia

Ce compte a été clôturé en 2000, les recettes et les dépenses liées à *Metrologia* ont été imputées dans les chapitres concernés du Compte I. — Fonds ordinaires.

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

Actif au 1 ^{er} janvier 2001	625 077,75
Recettes	
Intérêts des fonds	40 241,83
Réévaluation de l'actif au 31 décembre 2001	8 261,16
Total des recettes	48 502,99
Dépenses	
Subvention des cotisations des retraités	19 839,63
Total des dépenses	19 839,63
Actif au 31 décembre 2001	653 741,11

14.1.8 Bilan au 31 décembre 2001

Compte I « Fonds ordinaires »	6 849 066,09
Compte II « Caisse de retraite »	10 547 903,46
Compte III « Fonds spécial pour l'amélioration du matériel scientifique »	0,00
Compte IV « Caisse de prêts sociaux »	194 983,92
Compte V « Réserve pour les bâtiments »	0,00
Compte VI « Metrologia »	0,00
Compte VII « Fonds de réserve pour l'assurance maladie »	653 741,11
Actif net	18 245 694,58
Cet actif net se décompose comme suit :	
<i>a. Fonds déposés en banque :</i>	
1° En euros	10 498 033,85
2° En dollars américains (0,8813 USD = 1 EUR)	3 890 630,20
3° En francs suisses (1,4829 CHF = 1 EUR)	52 517,18
4° En livres sterling (0,6085 GBP = 1 EUR)	665 901,75
5° En Deutsche Marks (1,95 583 DEM = 1 EUR)	255 645,94
6° En couronnes suédoises (9,3012 SEK = 1 EUR)	118 279,81
7° En couronnes norvégiennes (7,9515 NOK = 1 EUR)	125 762,43
8° En couronnes danoises (7,4365 DKK = 1 EUR)	1 831 665,95
9° En lires italiennes (1 936,27 ITL = 1 EUR)	981 268,11
Total des fonds déposés en banque	18 419 705,22
<i>b. Espèces en caisse :</i>	
1° En francs français (6,55 957 FRF = 1 EUR)	2 322,80
2° En dollars américains (0,8813 USD = 1 EUR)	793,58
3° En francs suisses (1,4829 CHF = 1 EUR)	147,01
4° En livres sterling (0,6085 GBP = 1 EUR)	241,89
5° En Deutsche Marks (1,95 583 DEM = 1 EUR)	29,66
6° En yens (115,33 JPY = 1 EUR)	626,43
7° En florins (2,20 371 NLG = 1 EUR)	40,93
8° En dollars canadiens (1,4077 CND = 1 EUR)	12,79
9° En pesetas (166,386 ESP = 1 EUR)	179,35
10° En escudos (200,482 PTE = 1 EUR)	59,85
11° En dollars australiens (1,728 AUD = 1 EUR)	1 031,28
12° En schillings autrichiens (13,7603 ATS = 1 EUR)	83,52
13° En couronnes norvégiennes (7,9515 NOK = 1 EUR)	94,82
14° En marks finlandais (5,945 73 FIM = 1 EUR)	205,88
15° En lires italiennes (1 936,27 ITL = 1 EUR)	73,83
16° En dollars de Singapour (1,6306 SGD = 1 EUR)	32,37
17° En livres turques (1 269 500 TRL = 1 EUR)	56,42
Total des espèces en caisse	6 032,41
Actif brut (a + b)	18 425 737,63
<i>c. Créances de la Caisse de prêts sociaux</i>	112 177,71
<i>d. Provision pour remboursement aux États à déduire (1)</i>	-292 220,76
Actif net	18 245 694,58

(1) Compte « Remboursement aux États »

Situation au 1 ^{er} janvier 2001	483 994,35
Versements	
Versement par le Cameroun de ses contributions de 1995 (solde), 1996 et 1997 (acompte)	76 224,52
Versement par le Pakistan de ses contributions de 1999 (solde) et 2000 (acompte)	48 578,93
Versement par l'Argentine de ses contributions de 1998 (solde) et 1999 (acompte)	128 003,14
Total des versements	252 806,59
Remboursements aux États	
Compensation du remboursement d'avances faites pour le Cameroun (1992, 1993, 1994)	90 183,13
Compensation du remboursement d'avances faites pour le Chili (1999)	40 998,12
Compensation du remboursement d'avances faites pour le Pakistan (1992 à 1998)	236 623,94
Compensation du remboursement d'avances faites pour l'Uruguay (1997 et 1998)	76 774,99
Total des remboursements	444 580,18
Situation au 31 décembre 2001	292 220,76

14.2 Personnel

14.2.1 Engagements

- Mme Joële Viallon, née le 15 octobre 1973 à Lyon (France), de nationalité française, précédemment post-doctorante au Laboratorium für Organische Chemie, Zürich (Suisse), a été engagée au grade de *chimiste* dans la section de chimie à dater du 1^{er} juillet 2001.
- Mme Juliette Varenne, née le 19 août 1943 à Paris (France), de nationalité française, précédemment secrétaire dans une société privée française, a été engagée au grade de *secrétaire* à dater du 12 décembre 2001.
- Mme Hao Fang, née le 26 janvier 1970 au Zhejiang (Chine), de nationalité chinoise, précédemment *chercheur associé* dans la section des masses, a été engagée au grade de *physicien* à dater du 1^{er} janvier 2002.
- M. Michael B. Esler, né le 15 août 1963 à Albury (Australie), de nationalité australienne, précédemment *chercheur associé* post-doctorant à l'Australian Wine Research Institute, Adelaide (Australie), a été engagé au grade de *chimiste* dans la section de chimie à dater du 4 février 2002.
- M. Andrew J. Wallard, né le 11 octobre 1945 à Liverpool (Royaume-Uni), de nationalité britannique, précédemment sous-directeur du National Physical Laboratory, Teddington (Royaume-Uni), a été engagé comme *sous-directeur – directeur désigné* à dater du 6 mars 2002.
- M. François Ausset, né le 11 janvier 1971 à Grenoble (France), de nationalité française, précédemment acheteur dans une société privée française, a été engagé au grade d'*assistant* dans la section finances et administration pour prendre en charge la procédure des achats à dater du 8 avril 2002.

14.2.2 Promotions et changements de grade

- M. Michael Stock, *physicien*, a été nommé responsable de la section de photométrie et radiométrie à dater du 1^{er} septembre 2001 ; il a été promu au grade de *physicien principal* à dater du 1^{er} janvier 2002.
- Mme Penelope J. Allisy-Roberts, *physicien principal* dans la section des rayonnements ionisants, a été promue au grade de *physicien chercheur principal* à dater du 1^{er} janvier 2002.

- Mme Josette Coarasa, *technicien principal* dans la section des masses, a été promue au grade de *technicien métrologiste* à dater du 1^{er} janvier 2002.
- M. Pascal Benoit, *électricien* à l'atelier, a été promu au grade de *technicien principal* à dater du 1^{er} janvier 2002.

14.2.3 Changements et transferts de postes

- M. Rainer Köhler, *physicien principal*, précédemment responsable de la section de photométrie et radiométrie, a pris en charge le nouveau poste de responsable de la section informatique et qualité à dater du 1^{er} septembre 2001.
- M. Laurent Le Mée, *assistant* dans la section de photométrie et radiométrie, a été transféré à la section informatique et qualité à dater du 1^{er} septembre 2001.
- M. Gerald Petitgand, *technicien* dans la section de photométrie et radiométrie, a été transféré à la section informatique et qualité à dater du 1^{er} septembre 2001.
- M. Leonid Vitouchkine, *physicien principal* dans la section des masses, a été transféré à la section des longueurs à dater du 1^{er} octobre 2001.

14.2.4 Chercheurs associés

- M. Harold V. Parks, né le 10 août 1971 à Seattle (États-Unis), de nationalité américaine, précédemment *chercheur associé* à l'université du Colorado, Boulder (États-Unis), a été engagé au grade de *chercheur associé* dans la section des masses à dater du 16 août 2001 pour une période de deux ans.
- M. Long-Sheng Ma, *chercheur associé* dans la section des longueurs depuis le 25 janvier 2000, est prolongé dans ses fonctions jusqu'au 30 juin 2006 et a été promu au grade de *chercheur associé supérieur* à dater du 1^{er} janvier 2002.
- Mme Cecilia Kessler, née le 24 mars 1969 à Pergamino (Argentine), de nationalité argentine, précédemment responsable des étalonnages à la Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires (Argentine), a été engagée au grade de *chercheur associé* dans la section des rayonnements ionisants pour une période de deux ans à dater du 22 avril 2002.

- Mme Stéphanie Maniguet, née le 9 octobre 1972 à Saint-Julien-en-Genevois (France), de nationalité française, précédemment étudiante en doctorat à l'université de Southampton (Royaume-Uni), a été engagée au grade de *chercheur associé* pour une période de deux ans à dater du 17 juin 2002. Elle travaillera au développement et à la maintenance de la base de données du BIPM sur les comparaisons clés.

14.2.5 Départs

- M. Roger Pello, *technicien métrologiste* dans la section de photométrie et radiométrie, a pris sa retraite le 30 septembre 2001 après 37 ans de service.
- M. Jean-Marie Chartier, *physicien chercheur principal*, responsable de la section des longueurs, a pris sa retraite le 28 février 2002 après 45 ans de service.
- Mme Annick Chartier, *technicien principal* dans la section des longueurs, a pris sa retraite le 28 février 2002 après 34 ans de service.
- Mme Lucienne Delfour, *secrétaire*, a pris sa retraite le 30 juin 2002 après 34 ans de service.

Lors de leur départ à la retraite, le directeur a remercié chacun de ces membres du personnel pour leur service efficace et dévoué pendant toutes les années passées au BIPM.

14.3 Bâtiments

14.3.1 Petit Pavillon

- Rénovation de la décoration intérieure.

14.3.2 Grand Pavillon

- Installation d'un ascenseur d'escalier.
- Peinture de la cage d'escalier.

14.3.3 Bâtiment des lasers

- Rénovation de l'ancien atelier de menuiserie pour y installer un atelier d'électronique.

14.3.4 Observatoire

- Remplacement partiel du système de conditionnement d'air dans la salle 18.
- Rénovation des salles 9 et 10.
- Rénovation de la salle 11 pour y installer une salle informatique et un système de conditionnement d'air.

14.3.5 Bâtiment des rayonnements ionisants

- Réfection de la toiture pour réfection de l'étanchéité.
- Remplacement de portes au rez-de-jardin après une fuite.

14.3.6 Pavillon du Mail

- Installation d'un paratonnerre.

14.3.7 Extérieurs et parc

- Finition des abords du Pavillon du Mail.

LISTE DES SIGLES UTILISÉS DANS LE PRÉSENT VOLUME

1 Sigles des laboratoires, commissions et conférences

ADELA	Dynamical Astronomy in Latin America
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
AIST	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, <i>voir</i> NMIJ/AIST
AOS	Astrogeodynamical Observatory, Borowiec (Pologne)
APMP	Asia/Pacific Metrology Programme
ARPANSA	Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, Sydney et Melbourne (Australie)
BARC	Bhabha Atomic Research Centre, Trombay (Inde)
BEMC	British Electromagnetic Conference
BEV	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Vienne (Autriche)
BGK	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main (Allemagne)
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)
BNM-SYRTE	Bureau national de métrologie, Systèmes de référence temps espace, Paris (France)
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières, Paris (France)
BRML	Biroul Roman de Metrologie Legala, Bucarest (Roumanie)

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, Querétaro (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
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Madrid (Espagne)
CIPM	Comité international des poids et mesures
CMI	Český Metrologický Institut/Czech Metrological Institute, Prague et Brno (Rép. tchèque)
CMI-IIR	Český Metrologický Institut /Czech Metrological Institute, Inspectorate for Ionizing Radiation, 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

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

COPUOS	Committee on the Peaceful Uses of Outer Space of the United Nations
CPC	Conventions Product Centre of the IERS, <i>voir</i> IERS
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)
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)
DFM	Danish Institute of Fundamental Metrology, Lyngby (Danemark)
EFTF	European Frequency and Time Forum
EIM	Hellenic Institute of Metrology, Sindos (Grèce)
ENEA	Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, Rome (Italie)
ENS	École normale supérieure, Paris (France)
EOST	École et Observatoire de physique du Globe, Strasbourg (France)
ESA	Agence spatiale européenne
ETL*	Electrotechnical Laboratory, Tsukuba (Japon), <i>voir</i> NMIJ/AIST
EUROLAB	European Federation of National Associations of Measurement Testing and Analytical Laboratories
EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
FCS	Frequency Control Symposium
FGI	Finnish Geodetic Institute, Masala (Finlande)
GAW	<i>voir</i> OMM-GAW
GREX	Groupe de recherche du CNRS : gravitation et expériences (France)
GSD	Geodetic Survey Division of Canada, Ottawa (Canada)
GT-RF	Groupe de travail du CCEM pour les grandeurs aux radiofréquences
GUM	Glówny Urząd Miar/Central Office of Measures, Varsovie (Pologne)

HIRCL	Hellenic Ionizing Radiation Calibration Laboratory, Athènes (Grèce)
IAEA	<i>voir</i> AIEA
IAG	Institut für Angewandte Geodäsie, Graz (Allemagne)
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
IFCC	International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine
IFIN	Institutul de Fizica si Inginerie Nucleara, Bucarest (Roumanie)
IGLOS-PP	International GLONASS Service Pilot Project
IGN	Instituto Geográfico Nacional, Madrid (Espagne)
IGS	International GPS Service for Geodynamics
IIR	<i>voir</i> CMI-IIR
ILAC	International Laboratory Accreditation Conference
ILP SOI	Institut de physique des lasers, S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg (Féd. de Russie)
IMGC	Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Turin (Italie)
ININ	Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Mexico (Mexico)
INM	Institut national de métrologie, Bucarest (Roumanie)
INM*	Institut national de métrologie, Paris (France), <i>voir</i> BNM-INM
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, Rio de Janeiro (Brésil)
ION	Institute of Navigation, Alexandria VA (États-Unis)
IOP	Institute of Physics, Londres (Royaume-Uni)
IPGP	Institut de physique du Globe, Paris (France)
IRA	Institut de radiophysique appliquée, Lausanne (Suisse)
IRAC	U.K. Health and Safety Commission Ionizing Radiation Advisory Committee (Royaume-Uni)

IRD*	<i>voir</i> LNMRI
IRMM	Institut des matériaux et mesures de référence, Commission européenne/Institute for Reference Materials and Measurements, European Commission
ISI	Institute of Scientific Instruments, Brno (Rép. tchèque)
ISO	Organisation internationale de normalisation
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
JCTLM	Comité commun pour la traçabilité en médecine de laboratoire/Joint Committee on Traceability in Laboratory Medicine
JILA	Joint Institute for Laboratory Astrophysics, Boulder CO (États-Unis)
JV	Justervesenet, Kjeller (Norvège)
KFDA	Korean Food and Drug Administration, Seoul (Rép. de Corée)
KRISS	Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon (Rép. de Corée)
LCIE*	Laboratoire central des industries électriques, Fontenay-aux-Roses (France), <i>voir</i> BNM-LCIE
LGC	Laboratory of the Government Chemist, Teddington (Royaume-Uni)
LGC-VAM	Laboratory of the Government Chemist, Valid Analytical Measurement, Teddington (Royaume-Uni)
LNE*	Laboratoire national d'essais, Paris (France), <i>voir</i> BNM-LNE
LNHB*	Laboratoire national Henri Becquerel, Gif-sur-Yvette (France), <i>voir</i> BNM-LNHB
LNMRI	Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, Rio de Janeiro (Brésil)
LPL	Laboratoire de physique des lasers, Villetaneuse (France)

LPTF*	Laboratoire primaire du temps et des fréquences, Paris (France), <i>voir</i> 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)
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
NIBSC	U.K. National Institute for Biological Standards and Control, Herts (United Kingdom)
NIM	Institut national de métrologie, Beijing (Chine)
NIS	National Institute for Standards, Le Caire (Égypte)
NIST	(ex NBS) National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD (États-Unis)
NMi VSL	Nederlands Meetinstituut, Van Swinden Laboratorium, Delft (Pays-Bas)
NMIJ/AIST	National Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba (Japon)
NMC	National Measurement Conference
NML	National Metrology Laboratory, Dublin (Irlande)
NML-CSIRO	National Measurement Laboratory, CSIRO, Pretoria (Australie)
NPL	National Physical Laboratory, Teddington (Royaume-Uni)
NRC	National Research Council of 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
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
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)
OMS	Organisation mondiale de la santé
ONBA	Observatorio Naval, Buenos Aires (Argentine)
ONERA	Office national d'études et de recherches aérospatiales, Châtillon (France)
OP	Observatoire de Paris (France)
ORB	Observatoire royal de Belgique, Bruxelles (Belgique)
PITTCON	Pittsburgh Conference
PSB*	Singapore Productivity and Standards Board, Singapour (Singapour), <i>voir</i> SPRING
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig et Berlin (Allemagne)
PTTI	Precise Time and Time Interval Applications and Planning Meeting
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
ROA	Real Instituto y Observatorio de la Armada, San Fernando (Espagne)
SEMETRO	Seminário Internacional de Metrologia Elétrica
SFSM	Symposium on Frequency Standards and Metrology
SMB	Service de la métrologie belge, Bruxelles (Belgique)
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
SPRING	(ex PSB) Standards, Productivity and Innovation Board, Singapour (Singapour)
SRPI	Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm (Suède)
SSDL	Secondary Standards Dosimetry Laboratories of the IAEA, <i>voir</i> AIEA
SYRTE*	Systèmes de référence temps espace, <i>voir</i> BNM
SZMDM	Bureau fédéral des mesures et métaux précieux, Belgrade (Yougoslavie)
UAI	Union astronomique internationale

UICPA	Union internationale de chimie pure et appliquée
UIT	Union internationale des télécommunications
UME	Ulusal Metroloji Enstitüsü/National Metrology Institute, Marmara Research Centre, Gebze-Kocaeli (Turquie)
UNIDO	United Nations Industrial Development Organization
USNO	U.S. Naval Observatory, Washington DC (États-Unis)
VAM	Valid Analytical Measurement, <i>voir</i> LGC
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-Petersbourg (Féd. de Russie)
VSL*	Van Swinden Laboratorium, Delft (Pays-Bas), <i>voir</i> NMi VSL
VTT	Centre for Metrology and Accreditation, Technical Research Centre of Finland, Espoo (Finlande)

2 Sigles des termes scientifiques

ACES	Atomic Clock Ensemble in Space
CMC	Aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages/ Calibration and Measurement Capabilities
DPSS	Distributed-Parallel Storage System
EAL	Échelle atomique libre
EIT-90	Échelle internationale de température de 1990
FT-IR	Fourier Transform Infrared Technique
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GUM	Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure
ICRF	International Celestial Reference Frame
ITS-90	International Temperature Scale of 1990, <i>voir</i> EIT-90
JPS	Javad Positioning System
KCDB	Base de données du BIPM sur les comparaisons clés/ BIPM Key Comparison Database
KTP	Potassium titanyle phosphate
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SI	Système international d'unités
SIR	Système international de référence pour les mesures d'activité d'émetteurs de rayonnement gamma
SRP	Photomètre de référence étalon/Standard Reference Photometer

TAI	Temps atomique international
TDCR	Méthode du rapport des coïncidences triples aux coïncidences doubles/Triple-to-double Coincidence Ratio Method
TSA	Time Scale Algorithms
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