

Bureau international des poids et mesures

Comité consultatif des longueurs (CCL)

10^e session (septembre 2001)

Note sur l'utilisation du texte anglais (*voir* page 71).

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

Conception graphique :
Monika Jost

Imprimé par : Stedi, Paris
Dépôt légal, n°
Achevé d'imprimer : avril 2003

ISSN 1684-8845
ISBN 92-822-2197-0

TABLE DES MATIÈRES

Photographie des participants à la 10^e session du Comité consultatif des longueurs **2**

États membres de la Convention du Mètre et associés à la Conférence générale **7**

Le BIPM et la Convention du Mètre **9**

Liste des membres du Comité consultatif des longueurs **13**

Rapport au Comité international des poids et mesures,

par A. Sacconi et A. Lewis **15**

Ordre du jour 16

1 Ouverture de la session ; désignation d'un rapporteur ; approbation de l'ordre du jour **17**

2 Rapport du directeur sur la mise en œuvre de l'Arrangement de reconnaissance mutuelle **18**

3 Examen des réponses au questionnaire du BIPM **20**

4 Présentation de nouveaux résultats liés aux points traités dans le questionnaire **21**

5 Rapport du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle (état d'avancement des comparaisons clés) **21**

6 Rapport du Groupe de travail sur la mise en pratique **28**

7 Modifications au texte de la mise en pratique de la définition du mètre de 1997, et propositions de nouvelles radiations recommandées **30**

8 Identification de nouvelles comparaisons clés **32**

9 Travaux du Bureau international **33**

9.1 Comparaison clé en cours du BIPM à 633 nm **33**

9.2 Autres comparaisons internationales de lasers asservis **34**

9.3 Recherche et introduction de nouvelles techniques **35**

9.4 Nanométrie **35**

9.5 Collaboration avec les laboratoires nationaux **35**

10 Groupes de travail du CCL : composition et missions **36**

11 Recommandations au Comité international **37**

12 Questions diverses **37**

13 Prochaine session du CCL **38**

Recommandations présentées au Comité international des poids et mesures

CCL 1 (2001). Perspectives de la mise en pratique de la définition du mètre **41**

CCL 2 (2001). Nouvelles techniques utilisant des peignes de fréquence **42**

CCL 3 (2001). Révision des radiations recommandées **43**

CCL 4 (2001). Radiations de lampes spectrales et autres sources **44**

Recommandation adoptée par le Comité international des poids et mesures

1 (CI-2002). Révision de la mise en pratique de la définition du mètre **47**

Annexes

L 1. Documents de travail présentés à la 10^e session du CCL **59**

L 2. Données utilisées pour établir la liste des radiations recommandées, 2001 **61**

L 3. Fréquences absolues d'autres transitions proches de certaines des transitions recommandées et intervalles de fréquence entre transitions et composantes hyperfines **62**

L 4. Références **63**

Liste des sigles utilisés dans le présent volume 65

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

au 19 septembre 2001

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 |
| Etats-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 | Lettonie |
| Équateur | Lituanie |
| Hong Kong, Chine | Malte |

LE BIPM ET LA CONVENTION DU MÈTRE

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

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

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

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

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

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

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

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

Limitées à l'origine aux mesures de longueur et de masse et aux études métrologiques en relation avec ces grandeurs, les activités du Bureau international ont été étendues aux étalons de mesure électriques (1927), photométriques et radiométriques (1937), des rayonnements ionisants (1960), aux échelles de temps (1988) et à la chimie (2000). Dans ce but, un agrandissement des premiers laboratoires construits en 1876-1878 a eu lieu en 1929 ; de nouveaux bâtiments ont été construits en 1963-1964 pour les laboratoires de la section des rayonnements ionisants, en 1984 pour le travail sur les lasers, en 1988 pour la bibliothèque et des bureaux, et en 2001 a été inauguré un bâtiment pour l'atelier, des bureaux et des salles de réunion.

Environ quarante-cinq physiciens et techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau international. Ils y font principalement des recherches métrologiques, des comparaisons internationales des réalisations des unités et des vérifications d'étalons. Ces travaux font l'objet d'un rapport annuel détaillé qui est publié dans le *Rapport du directeur sur l'activité et la gestion du Bureau international des poids et mesures*.

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

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

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

- 1 le Comité consultatif d'électricité et magnétisme (CCEM), nouveau nom donné en 1997 au Comité consultatif d'électricité (CCE) créé en 1927 ;
- 2 le Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR), nouveau nom donné en 1971 au Comité consultatif de photométrie (CCP) créé en 1933 (de 1930 à 1933 le CCE s'est occupé des questions de photométrie) ;
- 3 le Comité consultatif de thermométrie (CCT), créé en 1937 ;
- 4 le Comité consultatif des longueurs (CCL), nouveau nom donné en 1997 au Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM) créé en 1952 ;
- 5 le Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF), nouveau nom donné en 1997 au Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS) créé en 1956 ;
- 6 le Comité consultatif des rayonnements ionisants (CCRI), nouveau nom donné en 1997 au Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants (CCEMRI) créé en 1958 (en 1969, ce Comité consultatif a institué quatre sections : Section I (Rayons x et γ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie α) ; cette dernière section a été dissoute en 1975, son domaine d'activité étant confié à la Section II) ;
- 7 le Comité consultatif des unités (CCU), créé en 1964 (ce Comité consultatif a remplacé la « Commission du système d'unités » instituée par le Comité international en 1954) ;
- 8 le Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM), créé en 1980 ;
- 9 le Comité consultatif pour la quantité de matière : métrologie en chimie (CCQM), créé en 1993 ;
- 10 le Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations (CCAUV), créé en 1998.

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 DES MEMBRES DU COMITÉ CONSULTATIF DES LONGUEURS

au 19 septembre 2001

Président

M. Chung Myung Sai, membre du Comité international des poids et mesures,
Korea Research Council of Fundamental Science and Technology,
Séoul.

Secrétaire exécutif

M. J.-M. Chartier, Bureau international des poids et mesures [BIPM], Sèvres.

Membres

Bureau national de métrologie, Institut national de métrologie [BNM-INM],
Paris.

Centre for Metrology and Accreditation/Mittatekniikan Keskus [MIKES],
Helsinki.

Centro Nacional de Metrología [CENAM], Querétaro.

Conseil national de recherches du Canada [NRC], Ottawa.

Český Metrologický Institut/Czech Metrology Institute [CMI], Prague.

Institut de métrologie D.I. Mendéléev [VNIIM], Gosstandart de Russie,
Saint-Petersbourg.

Institut national de métrologie [NIM], Beijing.

Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Consiglio Nazionale delle Ricerche
[IMGC-CNR], Turin.

Korea Research Institute of Standards and Science [KRISS], Daejeon.

National Institute of Standards and Technology [NIST], Boulder/Joint
Institute for Laboratory Astrophysics [JILA], Boulder.

National Measurement Laboratory, CSIRO [NML CSIRO], Lindfield.

National Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology [NMIJ/AIST], Tsukuba.

National Physical Laboratory [NPL], Teddington.

NMi Van Swinden Laboratorium, Nederlands Meetinstituut [NMi VSL], Delft.

Office fédéral de métrologie et d'accréditation [METAS], Bern-Wabern.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig.

Slovenský Metrologický Ústav/Slovak Institute of Metrology [SMU], Bratislava.

Ulusal Metroloji Enstitüsü/National Metrology Institute of Turkey [UME], Gebze-Kocaeli.

Le directeur du Bureau international des poids et mesures [BIPM], Sèvres.

Observateurs

Centro Español de Metrología [CEM], Madrid.

CSIR, Division of Production Technology [CSIR-NML], Pretoria.

Standards, Productivity and Innovation Board [SPRING], Singapour.

Comité consultatif des longueurs

Rapport de la 10^e session

(19-20 septembre 2001)

au Comité international des poids et mesures

Ordre du jour

- 1 Ouverture de la session ; désignation d'un rapporteur ; approbation de l'ordre du jour.
- 2 Rapport du directeur sur la mise en œuvre de l'Arrangement de reconnaissance mutuelle.
- 3 Examen des réponses au questionnaire du BIPM.
- 4 Présentation de nouveaux résultats liés aux points traités dans le questionnaire.
- 5 Rapport du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle (état d'avancement des comparaisons clés).
- 6 Rapport du Groupe de travail sur la mise en pratique.
- 7 Modifications au texte de la mise en pratique de la définition du mètre de 1997, et propositions de nouvelles radiations recommandées.
- 8 Identification de nouvelles comparaisons clés.
- 9 Travaux du Bureau international :
 - 9.1 Comparaison clé en cours du BIPM à 633 nm ;
 - 9.2 Autres comparaisons internationales de lasers asservis ;
 - 9.3 Recherche et introduction de nouvelles techniques ;
 - 9.4 Nanométrie ;
 - 9.5 Collaboration avec les laboratoires nationaux.
- 10 Groupes de travail du CCL : composition et missions.
- 11 Recommandations au Comité international.
- 12 Questions diverses.
- 13 Prochaine session du CCL.

1 OUVERTURE DE LA SESSION ; DÉSIGNATION D'UN RAPPORTEUR ; APPROBATION DE L'ORDRE DU JOUR

Le Comité consultatif des longueurs (CCL) a tenu sa 10^e session au Bureau international des poids et mesures (BIPM), à Sèvres. Quatre séances ont eu lieu le mercredi 19 et le jeudi 20 septembre 2001.

Étaient présents : O. Acef (BNM-LPTF), P. Balling (CMI), R. Bergmans (NMI VSL), F. Bertinotto (IMGC-CNR), M.S. Chung (président du CCL), C.I. Eom (KRISS), R. Fira (SMU), P. Gill (NPL), J.L. Hall (NIST/JILA), J. Helmcke (PTB), L. Hollberg (NIST), E. Jaatinen (NML CSIRO), P. Juncar (BNM-INM), A.N. Korolev (VNIIM), T. Kurosawa (NMIJ/AIST), A. Lassila (MIKES), E. Latysheva (VNIIM), A. Lewis (NPL), A. Madej (NRC), H. Matsumoto (NMIJ/AIST), J. Pekelsky (NRC), T.J. Quinn (directeur du BIPM), A. Sacconi (IMGC-CNR), H. Schnatz (PTB), S. Shen (NIM), R. Thalmann (METAS), M. Viliesid (CENAM), T. Yandayan (UME), T. Yoon (KRISS).

Observateurs : E. Prieto (CEM), S. Tan (SPRING).

Invités : Y.S. Domnin (VNIIFTRI), A.J. Wallard (NPL).

Assistaient aussi à la session : P. Giacomo (directeur honoraire du BIPM) ; J.-M. Chartier, R. Felder, L.-S. Ma, S. Picard, L. Robertsson, C. Thomas, L.F. Vitouchkine (BIPM).

M. Chung souhaite la bienvenue aux délégués, observateurs et invités à la 10^e session du CCL. Il était prévu à l'origine de réunir le CCL en 2000, mais la réunion a été repoussée à une date ultérieure pour attendre les résultats de recherches intéressantes dans le domaine des lasers à impulsions femtosecondes et de la technologie des peignes de fréquence, ainsi que ceux des premières comparaisons clés du CCL et les déclarations d'aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages (CMCs). Il a donc été décidé de tenir la 10^e session du CCL fin 2001.

M. Quinn souhaite ensuite la bienvenue aux participants à la réunion, qui se tient dans un nouveau bâtiment du BIPM, le « Pavillon du Mail ». Il évoque brièvement les récents actes terroristes qui ont eu lieu aux États-Unis et suggère de respecter une minute de silence en marque de solidarité et de sympathie de la communauté internationale envers les personnes décédées.

Le président propose de nommer MM. Sacconi et Lewis rapporteurs. Cette proposition est approuvée.

Il est suggéré de discuter le point 5 de l'ordre du jour après le point 7, afin que le rapport final du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle (WGDM) soit achevé avant de le présenter. Cette inversion permettra aussi de discuter des conclusions du Groupe de travail sur la mise en pratique avant d'en arriver au point de l'ordre sur les modifications au texte actuel de la mise en pratique. Ces propositions sont approuvées, ainsi que l'ordre du jour. Dans ce rapport, la chronologie de l'ordre du jour original sera toutefois respectée.

2 RAPPORT DU DIRECTEUR SUR LA MISE EN ŒUVRE DE L'ARRANGEMENT DE RECONNAISSANCE MUTUELLE

M. Quinn informe les participants que l'Arrangement de reconnaissance mutuelle (MRA) a bien progressé depuis la précédente session du Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM) en 1997. Le MRA a été signé et le CCL a officiellement approuvé la première série de comparaisons clés du CCL, et celle-ci a débuté. Les progrès impressionnants réalisés dans la mise en œuvre du MRA sont dus à l'énorme quantité de travail effectué par les laboratoires nationaux de métrologie, lors de la procédure de soumission et d'examen des CMCs et de leur participation aux différentes comparaisons clés, supplémentaires et régionales. La charge de travail des laboratoires nationaux de métrologie est encore dans la phase initiale, qui est la plus lourde, mais nous espérons que cette charge diminuera à l'avenir.

Depuis 2000, la base de données du BIPM sur les comparaisons clés (KCDB) est ouverte au public et contient les déclarations d'aptitudes. La comparaison clé CCL-K1 de mesures de petits calibres par interférométrie est terminée ; les résultats et le rapport figurent dans la KCDB.

Les CMCs sont examinés par le Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM (JCRB), qui se réunit tous les six mois. Le JCRB a rendu hommage aux présidents des comités techniques des organisations régionales de métrologie pour leur travail acharné et leur coopération dans la mise en œuvre du MRA. M. Quinn note qu'il est très important que les présidents des comités techniques et ceux des organisations régionales de

métrologie aient été bien choisis, car le bon déroulement du MRA dépend d'eux.

La base de données du BIPM sur les comparaisons clés étant maintenant consultable sur le Web, la prochaine étape consiste à lui assurer une publicité aussi large que possible. Cela encouragera les utilisateurs de l'industrie à consulter la base et à se familiariser avec les données qu'elle contient.

Mme Thomas présente brièvement la base de données du BIPM sur les comparaisons clés, au moyen d'un ordinateur connecté à la base par le réseau. Elle montre la liste des comparaisons dans le domaine des longueurs, y compris les comparaisons clés régionales correspondant aux comparaisons clés du CCL. L'annexe B de la base de données contient les détails des comparaisons clés et de certaines comparaisons précédentes organisées par l'EUROMET et qui sont utilisées pour l'équivalence provisoire. Pendant la réunion du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle qui s'est tenue les deux jours précédents, des comparaisons similaires organisées par d'autres organisations régionales de métrologie ont été examinées ; elles seront enregistrées dans la base de données.

Les résultats de la comparaison clé CCL-K1 sont présentés à la réunion, avec les tables et graphes d'équivalence, les résultats transmis par les participants, les graphiques des résultats et l'explication du calcul des valeurs de référence de la comparaison clé et des degrés d'équivalence. Dans cette comparaison, le groupe responsable (le Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle) a décidé de ne pas publier de tableaux longs et détaillés donnant les valeurs de l'équivalence mutuelle pour toute la série des cales utilisées dans la comparaison, car il craint que cela ne porte à confusion. C'est expliqué dans le rapport.

En ce qui concerne l'annexe C, la première série de CMCs a été publiée par l'intermédiaire de la KCDB en décembre 2000. Elle comprenait alors environ 300 CMCs dans le domaine de la métrologie des longueurs. Il y a maintenant environ 10 000 CMCs dans la base, après l'adjonction de nombreux CMCs dans le domaine de l'électricité et du magnétisme, et de la métrologie en chimie. D'autres CMCs, dont un grand nombre dans le domaine des longueurs, sont prêts à être soumis à l'approbation du JCRB en octobre 2001.

Mme Thomas fait une présentation du moteur de recherche permettant d'accéder aux CMCs dans l'annexe C. Il est possible de sélectionner un service particulier de manière « verticale » (choix d'une branche, puis d'un service, puis d'un sous-service), ou de manière « horizontale » (choix direct d'un sous-service parmi la liste complète des sous-services). Les recherches

peuvent être faites à partir d'un grand nombre de critères, comme le pays, le domaine en métrologie, le sous-domaine, le laboratoire national de métrologie etc. Le résultat des recherches est présenté selon un format choisi pour comparer facilement les incertitudes données par les laboratoires ayant déclaré des CMCs. La liste des services a été élaborée selon une terminologie approuvée et adoptée par les organisations régionales de métrologie. Dans le domaine des longueurs, cette terminologie est connue sous le nom de « DimVIM » ; elle a été produite par le Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle. Cette approche a été suivie par d'autres Comités consultatifs.

3 EXAMEN DES RÉPONSES AU QUESTIONNAIRE DU BIPM

M. Chartier présente les réponses au questionnaire du BIPM qui a été envoyé aux participants avant la réunion. [La liste des réponses reçues figure à l'annexe L 1]. Nous avons reçu vingt-deux réponses (y compris celle du BIPM). Cette fois, l'étude a été faite par courrier électronique plutôt que par la poste, et il a été beaucoup plus facile d'envoyer les questionnaires et de collationner les réponses. Un résumé des réponses a été préparé (CCL/01-01b). Cinq laboratoires ont effectué des mesures absolues de fréquence ou de longueur d'onde de radiations qui ne figurent pas dans la mise en pratique. Quatre de ces cinq laboratoires pensent que ces nouvelles fréquences et longueurs d'ondes devraient figurer dans la mise en pratique (le BIPM s'est abstenu).

Dix laboratoires travaillent sur de nouveaux étalons et sur des générateurs de peignes. Cinq laboratoires ont noté des erreurs ou des omissions dans la liste de radiations recommandées de 1997, et six laboratoires souhaitent changer certaines valeurs de fréquence, de longueur d'onde ou d'incertitude figurant dans l'actuelle mise en pratique. Onze laboratoires au total pensent qu'il est souhaitable de réviser la mise en pratique en 2001.

Depuis la précédente réunion du CCL, dix-sept laboratoires ont participé à des comparaisons internationales de lasers asservis et vingt et un des vingt-deux laboratoires ayant répondu au questionnaire ont participé à des comparaisons internationales de métrologie dimensionnelle.

Les réponses étaient partagées au sujet de la création d'un nouveau groupe de travail sur la nanométrie (ou sur tout autre domaine), neuf laboratoires étant pour et huit contre la création d'un nouveau groupe de travail ; il est noté que ce sujet est considéré comme bien traité au sein du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle.

Enfin, M. Chartier présente une première liste provisoire de radiations recommandées.

4 PRÉSENTATION DE NOUVEAUX RÉSULTATS LIÉS AUX POINTS TRAITÉS DANS LE QUESTIONNAIRE

Les résultats les plus récents ont été présentés et discutés lors de la réunion du Groupe de travail sur la mise en pratique le jour précédent. Les discussions détaillées seront présentées dans le cadre du rapport au CCL du Groupe de travail sur la mise en pratique (point 6).

5 RAPPORT DU GROUPE DE TRAVAIL SUR LA MÉTROLOGIE DIMENSIONNELLE (ÉTAT D'AVANCEMENT DES COMPARAISONS CLÉS)

M. Pekelsky présente le rapport du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle (CCL/WGDM/01-43). Il note que tous les documents du groupe de travail seront disponibles à partir du site Web de ce groupe, sur le serveur du BIPM. Le Groupe de travail du CCL sur la métrologie dimensionnelle a pour mission de conseiller le CCL dans ce domaine, et de faire des recommandations sur les besoins et les priorités pour les comparaisons clés du CCL. Il permet d'échanger des informations sur les comparaisons internationales et les questions connexes, et maintient des relations avec les organisations régionales de métrologie pour s'assurer que le BIPM et les laboratoires nationaux de métrologie membres du CCL sont impliqués dans les principales comparaisons, se donnant ainsi les moyens

d'assurer la traçabilité internationale des mesures dimensionnelles au plus haut niveau d'exactitude. Le groupe de travail a accompli un travail considérable depuis la précédente session du CCL. Il s'est réuni chaque année et a créé sept groupes de discussion (dont les centres d'intérêt dépassent le cadre des laboratoires nationaux de métrologie membres du CCL), chargés d'étudier et de débattre des sujets des comparaisons clés programmées et à venir. Ces groupes de discussion sont les suivants :

DG2 – cales étalons ;

DG3 – règles ;

DG4 – mesures d'angle ;

DG5 – mesures de diamètre ;

DG6 – artefacts pour machines à mesurer les coordonnées (CMM) ;

DG7 – nanométrie ;

DG8 – dilatation thermique.

M. Pekelsky présente l'état d'avancement des comparaisons clés du CCL. Le CCL a approuvé six comparaisons clés en 1997. L'une d'elles, la comparaison CCL-K1, vient de s'achever, les autres se poursuivent. Le programme initial de ces comparaisons était le suivant :

| N° | Artefact | Laboratoire pilote | Début | Durée |
|--------|--------------------------------------|-----------------------|---------|--------|
| CCL-K1 | cales étalons | METAS (Suisse) | 03-1998 | 1,5 an |
| CCL-K2 | règles | NPL (Royaume-Uni) | 10-1999 | 1,5 an |
| CCL-K3 | étalons d'angle | CSIR (Afrique du Sud) | 07-1998 | 1,5 an |
| CCL-K4 | étalons de diamètre | NIST (États-Unis) | 09-1998 | 2 ans |
| CCL-K5 | artefacts unidimensionnels pour CMMs | PTB (Allemagne) | 03-1998 | 2 ans |
| CCL-K6 | artefacts bi-dimensionnels pour CMMs | CENAM (Mexique) | 01-2000 | 2 ans |

Chaque laboratoire pilote, parfois aidé d'un ou deux experts appartenant à d'autres laboratoires nationaux de métrologie, a établi un protocole technique qui a été approuvé par les participants et par le Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle ; ces protocoles sont consultables sur le site web du BIPM. À l'exception de la comparaison clé CCL-K1, les comparaisons ont débuté avec retard ou pris du retard. Le CCL a approuvé par

correspondance le rapport final de la comparaison CCL-K1 et l'expression des résultats utilisant la taille nominale des cales comme valeur de référence. Pour la plupart des comparaisons clés, il a été difficile de respecter les délais prévus ; certains participants ont eu des problèmes dans leurs équipements au moment d'effectuer leurs mesures, ou ont subi des retards considérables dans le transport, notamment lors du passage en douane. La seule comparaison clé du CCL terminée et publiée dans la base de données, la comparaison CCL-K1, a duré quatre ans entre le début de la comparaison et la publication des résultats dans la base de données – soit plus de deux fois la durée prévue. Si les autres comparaisons clés se déroulent de la même manière, la série initiale de comparaisons clés du CCL risque de ne pas être terminée en 2004.

M. Pekelsky présente sous forme de tableau l'état d'avancement des comparaisons clés du CCL :

| | CCL-K1 | CCL-K2 | CCL-K3 | CCL-K4 | CCL-K5 | CCL-K6 |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Début prévu | 09-1997 | 10-1997 | 01-1999 | 01-1999 | 01-1998 | 04-2000 |
| Début | 03-1998 | 09-1999 | 07-2000 | 11-2000 | 04-1999 | 01-2001 |
| Fin | 09-1999 | 08-2001 | 07-2002 | 04-2002 | 11-2001 | 12-2002 |
| Projet A de rapport | 09-1999 | 09-2001 | — | — | — | — |
| Projet B de rapport | 01-2001 | — | — | — | — | — |
| Annexe B | 08-2001 | 09-2003 | 07-2004 | 04-2004 | 11-2003 | 12-2004 |

M. Pekelsky décrit ensuite l'état actuel des comparaisons clés du CCL, les études du groupe de discussion 7 sur la nanotechnologie et les travaux du groupe de discussion 8.

CCL-K1. Cales de petite dimension, dix en acier et dix en carbure de tungstène, de 0,5 mm à 100 mm. Les résultats figurent dans l'annexe B et le laboratoire pilote a soumis un rapport à *Metrologia* pour publication. Notons qu'il a fallu environ deux ans entre le début et la fin du travail technique et deux ans pour l'analyse, l'approbation et la publication dans l'annexe B.

CCL-K2. Quatre cales en acier, de longueur 175 mm, 500 mm, 500 mm et 900 mm. La circulation des cales est terminée, et les résultats pour le projet A de rapport viennent d'être discutés avec certains participants présents à la 6^e réunion du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle. Un des pays participant à cette comparaison a rencontré de sérieux problèmes douaniers. Les compétences techniques des participants étaient en général excellentes, mais peut-être amplifiées parce que l'incertitude estimée par le

laboratoire pilote sur le coefficient de dilation thermique est faible (non représentative des étalonnages effectués pour les clients). Le Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle recommande maintenant de fournir les propriétés nominales fournies par les fabricants (pas mieux), après avoir vérifié que la valeur réelle se situe dans les limites de tolérance normales.

CCL-K3. Un polygone à douze faces et quatre étalons d'angle de 5", 30", 5' et 5°. Cette comparaison a été retardée pour trouver des artefacts convenables, et aussi en raison de problèmes de communication entre le laboratoire pilote et les participants. Le polygone a aussi été endommagé pendant le transport entre les participants, quand un écrou de blocage s'est dévissé dans le boîtier et est venu frotter contre les faces du polygone pendant le transport : les dommages ont été considérés comme mineurs, et la circulation des étalons se poursuit. Quant aux autres problèmes, le Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle a recommandé de renforcer les moyens de communication, et aussi d'adapter le programme de la comparaison pour effectuer les mesures avec COOMET à la fin, après une mesure de contrôle du laboratoire pilote.

CCL-K4. Partie a) quatre bagues ayant un diamètre intérieur compris entre 5 mm et 100 mm, et partie b) cinq tampons ayant un diamètre extérieur compris entre 2 mm et 98,5 mm. Certains laboratoires nationaux de métrologie ont eu des problèmes d'équipement, et le programme de la comparaison a dû être modifié, avec COOMET à la fin. On a observé de la corrosion sur deux tampons, hors des positions de mesure des diamètres. Des marques d'alignement supplémentaires ont été ajoutées pendant la circulation des étalons pour mieux indiquer la position des mesures sur certains artefacts. Un participant a commenté que des défauts de forme (circularité) de la surface des étalons étaient susceptibles de l'empêcher de réaliser l'incertitude déclarée dans les CMCs de l'annexe C.

CCL-K5. Étalons pour les machines à mesurer les coordonnées unidimensionnelles (CMM) : trois barres à billes (de 400 mm et 800 mm en acier, et de 800 mm en invar) et un calibre à gradins de 1 mètre (en acier, avec des inserts en céramique). Certains laboratoires nationaux de métrologie (CSIR, IMGC et NRC) ont subi des pannes ou des problèmes d'équipements, et ils ont demandé de refaire des mesures bilatérales avec le laboratoire pilote, après la comparaison. Par ailleurs, la plupart des résultats ont été envoyés au laboratoire pilote, seules les mesures du VNIIMS sont en attente.

CCL-K6. Étalons pour les machines à mesurer les coordonnées bi-dimensionnelles : plaque à billes en acier avec des billes en céramique disposées en réseau de 5 × 5 de 22 mm de diamètre avec des distances

élémentaires entre centres de 83 mm ; plaque à trous en zérodur avec un réseau de trous de 20 mm de diamètre avec des distances élémentaires entre axes de 50 mm. Cinq laboratoires nationaux de métrologie ont fini leurs mesures, et l'envoi des étalons à COOMET sera repoussé jusqu'à la fin du programme, ce qui prolongera un peu la durée de la comparaison.

Nanométrie. Ce groupe de discussion, composé de presque deux douzaines d'experts techniques, a été très actif pendant la période couverte par le rapport ; il a communiqué principalement par courrier électronique, ainsi que pendant la réunion générale au BIPM (en février 1999). Lors de cette réunion, cinq sujets d'études pilotes ont été identifiés, impliquant les mesurandes nécessaires dans le domaine des nanosciences et des nanotechnologies.

| Nom | Artefact | Laboratoire pilote | Nombre de participants | Dates |
|-------|----------------------------|--------------------|------------------------|---------------------|
| NANO1 | largeur de traits | NIST (États-Unis) | 9 | à décider |
| NANO2 | hauteur de marches | PTB (Allemagne) | 14 | 10-2000 – 01-2002 |
| NANO3 | règles à traits | PTB (Allemagne) | 15 | 04-2000 – 02-2002 |
| NANO4 | réseaux uni-dimensionnels | METAS (Suisse) | 11 | 02-1999 – 05-2000 |
| NANO5 | grilles bi-dimensionnelles | DFM (Danemark) | 7 | 03-2002 – à décider |

Ces projets ont beaucoup progressé. Le projet NANO4 est achevé, et le rapport final a été préparé. Les projets NANO2 et NANO3 sont en cours, la circulation des artefacts du projet NANO3 venant de s'achever. Les laboratoires pilotes des projets NANO1 et NANO5 ont effectué un important travail de préparation pour produire des artefacts convenables.

Dilatation thermique. Ce groupe de discussion a été présidé par le NMIJ/AIST (Japon), qui dispose d'un bon nombre d'équipements pour la caractérisation de la dilatation thermique sur un domaine large. L'intérêt des membres du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle pour ce sujet est très grand, mais seuls quelques laboratoires sont actuellement équipés pour effectuer des mesures. Une étude pilote a été proposée par le président du groupe de discussion lors de la 6^e réunion du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle, suggérant des mesures d'artefacts en céramique (calibres) dans trois domaines de température : entre 10 °C et 30 °C, entre 200 °C et 800 °C, et entre –200 °C et 0 °C. Le domaine avoisinant 20 °C (température de référence de l'ISO pour la métrologie dimensionnelle) est

d'un intérêt évident pour le groupe de travail, les autres domaines de température sont importants pour la science des matériaux. Le Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle a recommandé que le président du groupe de discussion débâte de cette proposition avec les experts techniques du groupe afin de mettre au point les détails des mesures et le niveau d'aptitude requis des autres laboratoires pour participer au projet.

Le choix des comparaisons clés a été discuté lors de chacune des quatre réunions du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle. Le fait de débiter de nouvelles comparaisons a des implications en termes de ressources, car il faut établir la liaison aux comparaisons des organisations régionales de métrologie, un certain nombre de laboratoires (choisis parmi les membres du CCL) devant participer aux deux comparaisons. Il serait préférable de débiter des comparaisons supplémentaires (des organisations régionales de métrologie ou du CCL), parce qu'elles ne nécessitent pas un lien direct avec d'autres comparaisons, ce qui réduit la charge de travail de moitié. Un nouveau groupe de discussion (le groupe 1) sera établi pour examiner la question du choix de sujets appropriés de comparaisons clés.

Le Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle a discuté de l'emploi des valeurs de référence des comparaisons clés du CCL fondées sur des artefacts et de la liaison entre la valeur de référence de la comparaison clé et la valeur correspondante des comparaisons des organisations régionales de métrologie, dans le but d'établir les degrés d'équivalence mutuelle. Dans le domaine de la métrologie dimensionnelle, les propriétés des artefacts peuvent déterminer les aptitudes globales d'un laboratoire. Ainsi, la valeur de référence de la comparaison clé est applicable seulement aux résultats obtenus avec un artefact particulier, et c'est un mauvais test sur les aptitudes des participants à réaliser l'unité du SI et à la transférer à tous les étalons matériels. De plus, les propriétés des artefacts peuvent avoir occasionner un décalage positif sur les résultats d'une comparaison, mais un décalage négatif sur les résultats d'une autre. Il n'est peut-être pas fiable d'essayer ainsi de lier deux comparaisons, en modifiant les résultats de l'une d'après les résultats de l'autre. Chaque comparaison pourrait être considérée comme un test d'aptitude séparé, destiné à vérifier les compétences plutôt que la réalisation des unités SI. Le Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle a décidé d'attendre la publication des premiers résultats d'une comparaison d'une organisation régionale de métrologie liée à la comparaison CCL-K1 avant de prendre une décision définitive. Les résultats d'une comparaison de l'EUROMET de petites cales étalons sont attendus d'ici quelques jours.

Bien que cela ne dépende pas directement du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle, la liste des services pour l'annexe C (CMCs) a été discutée lors de ses réunions, parce que les représentants des comités techniques sur les longueurs de la plupart des organisations régionales de métrologie y assistent. Ces discussions ont été profitables, et le Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle a préparé un document sur la terminologie commune pour la liste des services dans le domaine des longueurs. Ce document a été appelé « DimVIM » et les CMCs des longueurs de toutes les régions ont été classés suivant la liste des services « DimVIM ». Un projet du CEM, réalisé en parallèle, est mentionné, sur une classification correspondante en espagnol à utiliser par les laboratoires nationaux et secondaires et aussi à plus large échelle. D'autres Comités consultatifs ont compris les avantages de cette approche et ont produit leurs propres documents de classification des CMCs. De plus, le Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle a préparé des directives pour la préparation et le format des fichiers de CMCs. Ceci aide à assurer l'harmonisation des CMCs dans différentes régions, et à faciliter l'examen inter-régional. La conclusion de ce travail est que les CMCs soumis par les comités techniques sur les longueurs ont été les premiers publiés dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés.

M. Pekelsky résume son rapport et présente sous forme de tableau deux recommandations du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle au CCL :

CCL-WGDM-1 : formalités douanières pour les étalons utilisés dans les comparaisons clés du CCL

Le Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle recommande au CCL que chaque membre du CCL répondant à l'invitation qui lui est faite de participer à une comparaison clé doit fournir au président du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle et au laboratoire pilote toutes les informations nécessaires aux formalités douanières, ainsi que les références détaillées de la personne à contacter dans chaque laboratoire national de métrologie pour les questions douanières. Il faut absolument communiquer les renseignements à cette personne !

CCL-WGDM-2 : étude NANO4 (pas d'un réseau) pour l'annexe B provisoire

Étant donné que le Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle a effectué l'examen préalable et approuvé les résultats préliminaires de l'étude NANO4 sur le pas d'un réseau, le groupe recommande au CCL que, lorsque le rapport final sera prêt, les résultats de l'étude NANO4 soient officiellement approuvés et soumis pour publication dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés (annexe B), à condition que tous les participants en approuvent la publication.

Le CCL approuve à l'unanimité ces deux recommandations.

Pour que les études pilotes sur la nanométrie soient publiées dans l'annexe B afin d'appuyer les incertitudes déclarées dans les CMCs, elles doivent être classées comme comparaisons supplémentaires du CCL. Cela devra être discuté par les participants, parce que les résultats prennent alors une importance qu'ils n'ont pas actuellement. Bien que ces études aient été réalisées conformément aux directives pour les comparaisons clés du CIPM, les résultats étaient confidentiels. Leur publication dans l'annexe B signifie que les résultats seront publics, et il faut donc l'accord des participants.

6 RAPPORT DU GROUPE DE TRAVAIL SUR LA MISE EN PRATIQUE

M. Gill présente les points qui ont été discutés lors de la réunion du Groupe de travail sur la mise en pratique, le jour précédent, ainsi que l'ordre du jour de cette réunion. Les discussions portaient sur les propositions de nouvelles fréquences à inclure dans la mise en pratique, l'utilisation de nouvelles technologies comme les lasers à impulsions femtosecondes et les générateurs de peignes, et l'orientation probable des activités futures du BIPM dans le domaine des fréquences de lasers.

Depuis la précédente session du CCDM/CCL, nous avons franchi une étape dans le domaine des mesures de fréquences optiques et de longueurs d'onde, pour deux raisons :

Tout d'abord, les facteurs de qualité (Q) expérimentaux de raies obtenus avec des étalons de fréquence à atomes refroidis et à ions piégés commencent

maintenant à s'approcher de leurs valeurs théoriques ; il est clair que ces recherches serviront de fondement à la prochaine génération d'étalons de fréquence et de longueur d'onde.

Deuxièmement, des mesures absolues de fréquence de ces étalons ont déjà été réalisées au moyen de la technique des peignes dans un domaine de fréquence très large. Ceci implique l'utilisation de systèmes lasers à impulsions femtosecondes à taux de répétition asservi permettant d'obtenir des espacements de modes hautement reproductibles en fréquence. Le peigne femtoseconde couvre un domaine de fréquence allant de quelques dizaines de nanomètres pour le laser de base jusqu'à plusieurs centaines de nanomètres, avec l'adjonction d'une fibre à microstructure. Des peignes à couverture large dans le domaine allant de 400 nm jusqu'à plus de 1200 nm sont maintenant utilisés ou en fabrication dans plusieurs laboratoires d'étalonnage, y compris le BIPM. Le Groupe de travail sur la mise en pratique pense que cette technologie constitue un pas en avant considérable pour les mesures et les comparaisons d'étalons de fréquence optique, ainsi que pour d'autres régions du spectre, en particulier pour l'étalon à césium à micro-onde qui permet la réalisation de la seconde du SI.

Compte tenu du domaine d'application étendu des lasers femtosecondes, il est maintenant possible de doubler la fréquence dans la partie infrarouge du peigne pour effectuer des comparaisons avec la partie verte du spectre du peigne, et ainsi de fixer sans équivoque l'enveloppe du peigne optique par rapport au mode d'espacement fondamental. Il est ensuite possible d'utiliser cette règle optique pour mesurer n'importe quelle fréquence du visible jusqu'au domaine de l'infrarouge moyen. Les comparaisons entre peignes ont déjà montré leur aptitude à effectuer des mesures avec une incertitude de quelques 10^{-15} . Les comparaisons effectuées avec d'autres chaînes de fréquence corroborent entièrement ces observations, avec cependant une exactitude légèrement plus faible, limitée principalement par la méthode de mesure utilisée pour les chaînes de fréquence, ou par la stabilité et la reproductibilité des étalons optiques. De plus, récemment, la combinaison d'un étalon de fréquence optique, fondé sur un ion refroidi unique, et d'un peigne à couverture large, asservi sur un étalon optique plutôt que sur un étalon à micro-onde, a permis d'expérimenter une horloge optique asservie sur la transition optique d'un ion refroidi, délivrant un domaine de fréquences allant du visible à l'infrarouge et aux fréquences micro-ondes. Il est envisagé que des systèmes à peignes expérimentaux, peut-être reliés à des étalons de fréquence fournis par le GPS, soient utilisés en métrologie

dimensionnelle. Il devrait ensuite être possible d'utiliser des peignes en interférométrie, comme sources de lumière pseudo-blanche.

M. Hall fait une brève présentation intitulée « Realizing the metre, today, tomorrow... ». Il compare la réalisation actuelle de la définition du mètre à l'aide de lasers à He-Ne et la précédente fondée sur un atome de krypton, aux réalisations futures fondées sur des systèmes à peignes à fibres optiques de structure alvéolaire. Notons que le bruit de ces derniers étalons de fréquence optiques est maintenant inférieur à celui des étalons de fréquence micro-ondes. M. Chung félicite M. Hall pour sa présentation.

7 MODIFICATIONS AU TEXTE DE LA MISE EN PRATIQUE DE LA DÉFINITION DU MÈTRE DE 1997, ET PROPOSITIONS DE NOUVELLES RADIATIONS RECOMMANDÉES

Six propositions de modifications de l'actuelle mise en pratique sont présentées ; elles concernent :

- CCL 1 : un changement du titre de la « mise en pratique » pour mieux refléter le vaste domaine d'applications, et pour inclure des applications aux représentations secondaires de la seconde ;
- CCL 2 : des recommandations sur l'utilisation de la technologie des peignes ;
- CCL 3 : des recommandations sur l'utilisation de radiations nouvelles ou révisées ;
- CCL 4 : le détail des valeurs révisées (fréquence et incertitude) ;
- CCL 5 : le détail des nouvelles radiations recommandées ;
- CCL 6 : le transfert de certaines radiations dans la liste des radiations secondaires.

Ces propositions sont ensuite discutées par le CCL.

La première proposition est clairement liée aux activités sur la représentation de la seconde, et implique de consulter le CCTF. Il en résulte une proposition de créer un groupe de travail commun au CCL et au CCTF. Le texte des propositions CCL 2 à CCL 4 et les listes de radiations et de valeurs recommandées devant être mis à jour sont discutés.

En ce qui concerne la proposition CCL 4, M. Quinn recommande de la réécrire sous forme de déclaration d'intention. Il note que le texte révisé doit être soumis au Groupe de travail sur la mise en pratique pour compléter la liste des références. Cependant, il faut beaucoup de temps pour recueillir une documentation exhaustive nécessaire à l'affinage des valeurs et M. Gill souligne que la proposition CCL 4 est seulement destinée à informer le CIPM, la révision officielle de la liste devant être préparée avec toute la documentation nécessaire. M. Quinn remarque que les nouveaux résultats ne sont acceptés qu'une fois publiés ; en ce moment la situation évolue rapidement, et l'on dispose de nombreux résultats nouveaux.

La proposition CCL 6 recommande de transférer dans la liste secondaire (lampes spectrales et autres sources) certains étalons de fréquence dont la valeur est peu susceptible d'être améliorée à l'avenir. Citons notamment les lasers de référence asservis sur l'iode à 640 nm, 612 nm, 515 nm et 543 nm. Certains d'entre eux sont des sources importantes utilisées en métrologie dimensionnelle (par exemple la radiation à 543 nm est utilisée couramment pour la métrologie des cales étalons) ou peuvent encore faire l'objet de recherches (par exemple pour mesurer les raies de niveau vibrationnel égal à zéro à 515 nm) ; leur transfert dans la liste secondaire ne signifie donc pas que ces radiations ne sont plus importantes. Ce transfert a l'avantage de permettre de continuer à les utiliser comme radiations recommandées pour la mise en pratique de la définition du mètre, sans qu'il soit nécessaire de mettre à jour les valeurs, ni de vérifier leur mise à jour. Il est décidé que cette proposition sera fondée sur la situation actuelle, mais rien n'empêche de présenter de nouvelles valeurs. Si nécessaire, un ou plusieurs de ces étalons pourraient être réintégrés à la liste principale, si les résultats de travaux à venir l'imposent.

D'après la discussion sur les propositions CCL 4 à CCL 6, il faudra encore du temps pour parvenir à un consensus, et ce ne sera pas possible lors de cette réunion. Il est donc décidé que les propositions CCL 1 à CCL 3 seront présentées sous forme de projet de recommandation au CIPM, et que les propositions CCL 4 à CCL 6 serviront de fondement à un document de travail provisoire soumis pour approbation de principe par le CCL au CIPM, mais laissant la possibilité de discussions ultérieures au sein du Groupe de travail sur la mise en pratique, pour vérification et confirmation des détails finaux. La date limite d'obtention des valeurs pour leur inclusion dans la nouvelle version de la mise en pratique est discutée, ainsi que les valeurs des fréquences et des incertitudes présentées dans le document de travail. Les textes des propositions CCL 4 à CCL 6 font l'objet d'une nouvelle

proposition conjointe, CCL 4 étant séparée en trois parties CCL 4-1 à CCL 4-3. Ces propositions sont à nouveau discutées par les membres du Groupe de travail sur la mise en pratique.

Après une discussion longue et controversée, les membres arrivent aux conclusions suivantes :

- en ce qui concerne la proposition CCL 4, les informations sont considérées comme provisoires, pour transmettre les grandes lignes au CIPM ;
- les valeurs et les incertitudes détaillées dans les propositions CCL 4-1 et CCL 4-2 sont toutes approuvées, le Groupe de travail sur la mise en pratique mettra à jour la nouvelle version de la mise en pratique avec ces valeurs d'ici quelques mois ;
- en dehors des valeurs figurant dans la proposition CCL 4, aucune nouvelle radiation ne sera admise dans la nouvelle version de la mise en pratique ;
- les nouvelles valeurs reçues dans les prochains mois ne seront pas admises pour publication dans la mise en pratique. Si ces valeurs induisent de sérieux doutes sur une valeur recommandée, ce sera signalé dans la mise en pratique.

Les recommandations au CIPM sont discutées au point 11.

8 IDENTIFICATION DE NOUVELLES COMPARAISONS CLÉS

Comme mentionné dans le rapport du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle, ce groupe n'a pas identifié de nouvelles comparaisons clés du CCL qu'il faudrait débiter maintenant dans le domaine de la métrologie dimensionnelle. Le groupe a décidé d'attendre que la série de comparaisons actuelles soit terminée avant d'en entreprendre de nouvelles. Cette proposition est approuvée.

Le Groupe de travail sur la mise en pratique demande à nouveau au CCL de lui déléguer son autorité pour décider s'il faut ou non débiter une comparaison clé de lasers à Nd:YAG asservis sur l'iode à 532 nm. Une telle

comparaison, si elle s'avérait nécessaire, pourrait débiter avant la prochaine session du CCL. Le CCL approuve cette proposition.

9 TRAVAUX DU BUREAU INTERNATIONAL

9.1 Comparaison clé en cours du BIPM à 633 nm

La comparaison clé en cours du BIPM à 633 nm, connue sous l'intitulé BIPM.L-K10, est discutée. Elle pose des questions intéressantes quant aux déclarations d'équivalence pour la base de données du BIPM sur les comparaisons clés. En général, lors du déroulement de la comparaison, les lasers qui y ont participé ont été ajustés, pour prendre en compte les résultats analysés, et à la fin de la comparaison, la plupart des lasers étaient en meilleur état qu'au début. C'est une particularité de cette comparaison, par rapport aux comparaisons de métrologie dimensionnelle dont l'étalon voyageur se dégrade généralement après chaque mesure. Toutefois, les deux séries de mesures (avant et après ajustement) ont été présentées dans les rapports soumis à *Metrologia* pour qu'ils puissent être analysés par les personnes intéressées.

Mme Picard présente le projet de rapport préparé pour publication dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés. Le format utilisé est le même que pour les autres comparaisons clés. Les données comprennent la liste des participants, les dates des mesures, les références aux publications dans *Metrologia*, les résultats individuels, les résumés des résultats (tableaux et graphiques) et les tableaux des degrés d'équivalence, par référence au laser BIPM-4. Ces résultats et l'interprétation en termes de degrés d'équivalence sont discutés.

Ce qui est important, c'est la stabilité des lasers des laboratoires nationaux de métrologie, et non l'écart originel par rapport à la valeur de référence du laser BIPM-4. De nombreux laboratoires nationaux de métrologie ont plusieurs lasers de référence, avec des écarts différents par rapport à la fréquence du laser BIPM-4, mais ces lasers sont très stables et la connaissance de cet écart permet d'utiliser ces lasers pour mesurer la fréquence des lasers d'essai. La fréquence des lasers de la plupart des laboratoires nationaux de métrologie est en accord avec celle du laser de

référence BIPM-4 à deux écarts-types près. On n'a mis en évidence la dérive d'aucun laser par rapport aux autres, aussi a-t-il été conclu que les lasers étaient stables et considérés comme équivalents. Pour les comparaisons futures, M. Chartier suggère de déclarer la différence par rapport à la valeur de la mise en pratique de la définition du mètre plutôt que par rapport à celle de BIPM-4.

Une discussion s'engage sur la distinction entre le rôle de transfert de technologie du BIPM et le rôle des comparaisons clés. M. Chartier souligne que depuis 1993 la procédure utilisée est celle décrite au paragraphe 3.2 de *Metrologia*, 1997, **34**, 297-300 ; les résultats préliminaires et finaux sont tous présentés dans les rapports.

En conclusion, il est proposé que les résultats de la comparaison BIPM.L-K10 soient publiés dans la base de données du BIPM sur les comparaisons clés comme ils ont été présentés au CCL, mais avec les modifications suivantes : le grand tableau contenant les degrés d'équivalence mutuelle sera supprimé ; la valeur du laser BIPM-4 sera utilisée comme valeur de référence de la comparaison clé ; et une déclaration sera ajoutée aux résultats, pour souligner qu'une différence de l'ordre de deux écarts-types par rapport à la valeur de référence n'a aucune signification particulière. Cette proposition est approuvée.

9.2 Autres comparaisons internationales de lasers asservis

Le Groupe de travail sur la mise en pratique note que l'unique comparaison clé de lasers asservis est la comparaison BIPM.L-K10 à 633 nm. Le départ à la retraite de M. Chartier prévu au début de l'année 2002 représente une perte d'expérience considérable dans le domaine des comparaisons de lasers. Cela devra être pris en compte lorsque l'on organisera des comparaisons futures de lasers. Les équipements au BIPM sont aussi importants, et il sera nécessaire d'utiliser pleinement les technologies les plus récentes, comme les générateurs de peignes, pour s'efforcer de maintenir au BIPM des aptitudes convenables dans le domaine des comparaisons de lasers dans le futur.

La comparaison en cours à 633 nm est considérée comme la partie principale du travail, mais les activités sur le laser à Nd:YAG à 532 nm prennent de plus en plus d'importance ; les comparaisons à 633 nm et à 532 nm se poursuivront par l'intermédiaire du BIPM. Il est proposé de déléguer au Groupe de travail sur la mise en pratique la décision d'organiser une comparaison clé du CCL (ou du CIPM) à 532 nm. Cette proposition est approuvée.

Il est proposé de préparer à l'avance un protocole strict pour toutes les comparaisons clés futures de fréquences de lasers, et de demander aux participants de mesurer la fréquence d'un laser inconnu. Avant de prendre part à la comparaison clé, les participants peuvent entreprendre une comparaison bilatérale ou autre, pour établir les différences de fréquence et les incertitudes (par exemple, avec deux lasers de chaque laboratoire national de métrologie). Cette proposition est approuvée.

9.3 Recherche et introduction de nouvelles techniques

Il est clair que les recherches liées à l'utilisation des technologies des peignes de fréquence sont d'une grande importance pour les comparaisons futures de fréquence. Le BIPM possède un peigne à impulsions femtosecondes en cours de mise en place, avec l'aide du JILA et il sera bientôt capable de mesurer des fréquences aux longueurs d'onde de 633 nm et de 532 nm avec ce peigne. On ne sait pas encore si le BIPM utilisera un peigne voyageur, ou un laser voyageur avec un peigne fixe au BIPM, mais M. Chartier pense que les mesures faites avec le peigne du BIPM dans un laboratoire national de métrologie seront probablement limitées à 633 nm.

9.4 Nanométrie

M. Vitouchkine présente un aperçu des activités du Groupe de discussion 7 du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle dans le domaine de la nanométrie. Une présentation détaillée a été faite lors de la réunion de ce groupe les deux jours précédents et les parties intéressées sont invitées à examiner les rapports qui seront placés sur les pages du groupe sur le serveur du BIPM.

9.5 Collaboration avec les laboratoires nationaux

On pense que les peignes seront plus utiles aux plus petits laboratoires nationaux de métrologie de chaque région qu'aux plus grands – un bon système à peigne pourrait être utile au niveau régional. Des mesures de peignes à impulsions femtosecondes à 633 nm pourraient être plus faciles à faire que des comparaisons directes de fréquence de lasers asservis.

Le travail sur les lasers à peigne au BIPM est important aussi pour la comparaison des étalons de fréquence du CCTF. Les horloges à fontaines fonctionnent maintenant avec une exactitude meilleure que 10^{-15} , alors que l'incertitude associée aux comparaisons de fréquence par satellite est de

l'ordre de 10^{-15} . Des étalons de fréquence optique portables pourraient servir de référence pour la stabilité à court terme et pourraient donc être bénéfiques pour effectuer de telles comparaisons de fréquence.

10 GROUPES DE TRAVAIL DU CCL : COMPOSITION ET MISSIONS

M. Pekelsky demande si les missions du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle doivent ou non être modifiées pour y inclure ses activités, au nom du CCL, relatives à la soumission et à l'examen des aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages. Il faut toutefois noter que cela impliquerait de présenter officiellement ces modifications avant le CCL, et à moins que cela ne soit vraiment urgent, cela pourrait attendre la prochaine session du CCL. La durée du mandat des présidents des groupes de travail est discutée. M. Quinn rappelle aux participants que les deux groupes de travail du CCL ayant un rôle consultatif, la durée du mandat de leur président correspond à celle comprise entre deux sessions du CCL. Il est donc nécessaire de nommer et d'approuver la nomination des présidents des deux groupes de travail pour la période allant jusqu'à la prochaine session du CCL. Le président du CCL demande si de nouveaux présidents sont proposés pour ces deux groupes de travail ; aucun nom nouveau n'est proposé. Il est demandé aux deux présidents actuels, MM. Gill et Pekelsky, s'ils veulent bien continuer à assurer la présidence de ces groupes ; tous deux acceptent. Le CCL reconduit donc M. Gill dans ses fonctions de président du Groupe de travail sur la mise en pratique et M. Pekelsky dans ses fonctions de président du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle.

La composition des deux groupes de travail est discutée. Les membres à part entière des groupes de travail doivent être membres ou observateurs du CCL ; les autres sont simplement invités. Il existe des listes officielles des membres de ces deux groupes de travail, approuvées par le CCL. Ces listes sont mises à jour. Aucun membre n'a demandé à quitter le Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle, et l'UME (Turquie) a demandé à s'y joindre. Aucun membre n'a demandé à quitter le Groupe de travail sur la mise en pratique, et les laboratoires suivants ont demandé à s'y joindre : le CENAM (Mexique), le CMI (Rép. tchèque), l'IMGC-CNR (Italie), le

MIKES (Finlande), le NMi VSL (Pays-Bas), et l'UME (Turquie). Ces changements sont approuvés.

Les avantages et inconvénients d'un groupe de travail commun au CCL et au CCTF sont discutés, en raison des activités communes aux deux Comités consultatifs. Le CCTF établissant une liste de fréquences secondaires pour la réalisation de la seconde, il risque d'y avoir des désaccords entre les fréquences figurant sur la liste du CCTF et celles de la mise en pratique. Il serait possible de les éviter en créant un nouveau groupe de travail, comprenant des membres des deux comités. Le CCL approuve à l'unanimité la création de ce groupe de travail et demande à M. Quinn de contacter les personnes concernées au sein du CCTF.

11 RECOMMANDATIONS AU COMITÉ INTERNATIONAL

Le CCL présente quatre recommandations :

La Recommandation CCL 1 (2001) sur les perspectives de la mise en pratique de la définition du mètre est adoptée.

La Recommandation CCL 2 (2001) sur les nouvelles techniques utilisant des peignes de fréquence est adoptée.

La Recommandation CCL 3 (2001) sur la révision des radiations recommandées est adoptée.

La Recommandation CCL 4 (2001) sur les radiations des lampes spectrales et autres sources est adoptée.

Des valeurs provisoires de lasers asservis sont discutées.

12 QUESTIONS DIVERSES

Avant la fin de la réunion, M. Quinn s'adresse aux participants pour rendre hommage au travail de M. Chartier, qui prendra sa retraite du BIPM au début de 2002. M. Quinn remercie M. Chartier, au nom de tous les participants,

pour le travail qu'il a effectué dans la section des longueurs pendant de nombreuses années, et pour l'aide qu'il a apportée aux représentants des nombreux laboratoires nationaux de métrologie avec lesquels il a travaillé pendant sa carrière au BIPM. Les participants à la réunion applaudissent chaleureusement M. Chartier.

M. Quinn informe le CCL qu'après le départ de M. Chartier du BIPM, M. Andrew Wallard, du NPL, le remplacera comme responsable de la section des longueurs du BIPM, en même temps qu'il assumera les fonctions de sous-directeur, directeur désigné du BIPM.

13 PROCHAINE SESSION DU CCL

Le Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle pense que les réunions du CCL devraient avoir lieu plus souvent que tous les quatre ans, pour faire progresser les travaux liés au MRA, et en particulier pour discuter et approuver les résultats des comparaisons clés du CCL. Il serait plus approprié, dans les prochaines années, que le CCL se réunisse tous les deux ans. Les groupes de travail pourraient se réunir plus souvent si nécessaire.

Il serait aussi bénéfique d'établir un comité commun au CCL et au CCTF avant la prochaine session de l'un ou l'autre de ces deux Comités consultatifs.

Ayant ces discussions à l'esprit, et considérant la nécessité de fixer une date provisoire, la date de la prochaine session du CCL est fixée (provisoirement) à septembre 2003, la date exacte sera confirmée après discussion avec les groupes de travail, y compris le nouveau groupe de travail commun au CCL et au CCTF, et approbation du CIPM. Il serait bénéfique que le Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle, et si nécessaire le Groupe de travail sur la mise en pratique, se réunissent pendant deux jours juste avant la prochaine session du CCL.

Le président exprime sa gratitude à tous les participants pour cette réunion active et fructueuse. La session est close.

MM. A. Sacconi et A. Lewis, rapporteurs

février 2002

révisé décembre 2002

**Recommandations du
Comité consultatif des longueurs**

**présentées au
Comité international des poids et mesures**

RECOMMANDATION CCL 1 (2001) :**Perspectives de la mise en pratique de la définition du mètre**

Le Comité consultatif des longueurs,

considérant

- que les activités liées aux mesures de temps ont une tendance croissante à se rapprocher des mesures de fréquences optiques ;
- que l'on assiste à un élargissement des perspectives d'application des radiations recommandées dans la mise en pratique en vue de couvrir, non seulement les besoins de la métrologie dimensionnelle et de la réalisation de la définition du mètre, mais encore ceux de la spectroscopie à haute résolution, de la physique atomique et moléculaire, des constantes fondamentales et des télécommunications ;

ayant noté que le Comité consultatif du temps et des fréquences a besoin d'une liste de représentations secondaires de la seconde ;

propose un titre plus large pour la mise en pratique, tel que « Radiations recommandées pour la réalisation de la définition du mètre et autres étalons de fréquence optiques, comprenant des étalons secondaires pour la représentation de la seconde ».

RECOMMANDATION CCL 2 (2001) :**Nouvelles techniques utilisant des peignes de fréquence**

Le Comité consultatif des longueurs,

considérant

- que les nouvelles techniques utilisant des peignes de fréquence produits à partir d'impulsions femtoseconde ont clairement un rôle à jouer pour rattacher la fréquence des étalons optiques de haute stabilité à celle de l'étalon primaire de fréquence à césium qui réalise la définition de la seconde du Système international d'unités (SI) ;
- que ces techniques fournissent un moyen commode de mesure pour assurer la traçabilité au SI ;
- que la technologie des peignes peut fournir des sources de fréquence aussi bien que des méthodes de mesure ;

reconnait que ces techniques sont appropriées et arrivent au bon moment ;

recommande de poursuivre les recherches en vue d'explorer toutes leurs possibilités ;

approuve les expériences en cours, qui visent à vérifier les résultats obtenus en les comparant à ceux que fournissent les méthodes utilisant des chaînes de synthèse de fréquence et

demande instamment aux laboratoires nationaux de métrologie et aux autres laboratoires de mettre en œuvre cette technologie au plus haut niveau d'exactitude tout en recherchant la plus grande simplicité en vue d'en généraliser les applications.

RECOMMANDATION CCL 3 (2001) :
Révision des radiations recommandées

Le Comité consultatif des longueurs,

considérant

- qu'un certain nombre de nouvelles valeurs de la fréquence de radiations émises par des étalons à atomes ou à ions refroidis, déjà incluses dans la liste des radiations recommandées, sont maintenant disponibles ;
- que les fréquences des radiations émises par plusieurs nouveaux ions refroidis ont été mesurées récemment ;
- que des valeurs améliorées pour la fréquence d'un certain nombre d'étalons de fréquence optiques, utilisant des cellules d'absorption à gaz, ont été récemment déterminées, y compris dans le domaine des longueurs d'onde qui intéresse les télécommunications optiques ;

décide de réviser la liste des radiations recommandées afin d'y inclure :

- des valeurs mises à jour de la fréquence pour les atomes refroidis de calcium et d'hydrogène et pour l'ion strontium piégé ;
- des valeurs de la fréquence pour de nouveaux ions piégés et refroidis, y compris l'ion mercure, l'ion indium et l'ion ytterbium ;
- des valeurs mises à jour de la fréquence pour les lasers asservis sur le rubidium, les lasers à grenat d'yttrium-aluminium dopé au néodyme (Nd:YAG) ou à hélium-néon asservis sur l'iode, les lasers à hélium-néon asservis sur le méthane et les lasers à dioxyde de carbone à 10 μm asservis sur le tétraoxyde d'osmium et
- des valeurs de la fréquence pour des étalons relevant des bandes des communications optiques, comprenant des lasers asservis sur le rubidium et sur l'acétylène.

RECOMMANDATION CCL 4 (2001) :**Radiations de lampes spectrales et autres sources**

Le Comité consultatif des longueurs,

considérant

- qu'il conviendrait d'ajouter à la liste des radiations recommandées par le Comité consultatif des longueurs un grand nombre de valeurs de fréquences d'atomes ou d'ions refroidis mesurées récemment ;
- que de nouveaux étalons, d'une meilleure exactitude, fondés sur des cuves à gaz, ont aussi été mis au point et mesurés ;
- qu'il est peu probable que les valeurs d'un certain nombre de radiations recommandées, telles que celles de lasers asservis sur l'iode, soient améliorées à l'avenir ;

reconnaît que ces radiations (y compris celles des lasers de référence asservis sur l'iode à 640 nm, 612 nm, 515 nm et 543 nm) doivent être transférées dans la liste des radiations de lampes spectrales et autres sources, mais confirme qu'elles restent valables pour la réalisation de la définition du mètre.

**Recommandation du
Comité consultatif des longueurs**

**adoptée par le
Comité international des poids et mesures**

RECOMMANDATION 1 (CI-2002) :
Révision de la mise en pratique de la définition du mètre

Le Comité international des poids et mesures,

rappelant

- qu'en 1983 la 17^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM) a adopté une nouvelle définition du mètre,
- qu'à la même date la Conférence générale a invité le Comité international des poids et mesures (CIPM)
 - à établir des instructions pour la réalisation pratique de la nouvelle définition du mètre (la mise en pratique),
 - à choisir des radiations qui puissent être recommandées comme étalons de longueur d'onde pour la mesure interférentielle des longueurs et à établir des instructions pour leur emploi,
 - à poursuivre les études entreprises pour améliorer ces étalons et à compléter ou réviser par la suite ces instructions,
- qu'en réponse à cette invitation le CIPM a adopté la Recommandation 1 (CI-1983) (mise en pratique de la définition du mètre) avec pour effet
 - que le mètre soit réalisé par l'une des méthodes suivantes :
 - a) au moyen de la longueur l du trajet parcouru dans le vide par une onde électromagnétique plane pendant la durée t ; cette longueur est obtenue à partir de la mesure de la durée t , en utilisant la relation $l = c_0 \cdot t$ et la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide $c_0 = 299\,792\,458$ m/s,
 - b) au moyen de la longueur d'onde dans le vide λ d'une onde électromagnétique plane de fréquence f ; cette longueur d'onde est obtenue à partir de la mesure de la fréquence f , en utilisant la relation $\lambda = c_0/f$ et la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide $c_0 = 299\,792\,458$ m/s,
 - c) au moyen de l'une des radiations de la liste ci-dessous, radiations pour lesquelles on peut utiliser la valeur donnée de la longueur d'onde dans le vide ou de la fréquence, avec l'incertitude indiquée, pourvu que l'on observe les conditions spécifiées et le mode opératoire reconnu comme approprié ;

- que dans tous les cas les corrections nécessaires soient appliquées pour tenir compte des conditions réelles telles que diffraction, gravitation ou imperfection du vide ;
- que dans le contexte de la relativité générale, le mètre est considéré comme une unité de longueur propre. Sa définition s'applique donc seulement dans un domaine spatial suffisamment petit, pour lequel les effets de la non-uniformité du champ gravitationnel peuvent être ignorés (notons, qu'à la surface de la Terre, cet effet est d'environ 1×10^{-16} par mètre d'altitude en valeur relative). Dans ce cas, les seuls effets à prendre en compte sont ceux de la relativité restreinte. Les méthodes locales, préconisées en *b)* et *c)* pour réaliser le mètre, fournissent le mètre propre, mais la méthode préconisée en *a)* ne le permet pas nécessairement. La méthode préconisée en *a)* devrait donc être restreinte aux longueurs *l* suffisamment courtes pour que les effets prévus par la relativité générale soient négligeables par rapport aux incertitudes de mesure. Si ce n'est pas le cas, il convient de se référer au rapport du Groupe de travail du Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF) sur l'application de la relativité générale à la métrologie pour l'interprétation des mesures (Application of general relativity to metrology, *Metrologia*, 1997, **34**, 261-290),
- que le CIPM avait recommandé une liste de radiations à cet effet ;

rappelant aussi qu'en 1992 et en 1997 le CIPM a révisé la mise en pratique de la définition du mètre ;

considérant

- que la science et les techniques continuent à exiger une meilleure exactitude dans la réalisation du mètre ;
- que, depuis 1997, les travaux effectués dans les laboratoires nationaux, au BIPM et dans d'autres laboratoires ont permis d'identifier de nouvelles radiations et des méthodes pour leur mise en œuvre qui conduisent à de plus faibles incertitudes ;
- que l'on s'oriente de plus en plus vers des fréquences optiques pour les activités liées au temps, et que l'on continue à élargir le domaine d'application des radiations recommandées dans la mise en pratique, non seulement à la métrologie dimensionnelle et à la réalisation du mètre, mais aussi à la spectroscopie de haute résolution, à la physique atomique et moléculaire, aux constantes fondamentales et aux télécommunications ;

- que l'on dispose maintenant d'un certain nombre de nouvelles valeurs plus exactes de l'incertitude des fréquences de radiations d'atomes et d'ions refroidis très stables déjà mentionnées dans la liste de radiations recommandées, que la valeur de la fréquence de la radiation de plusieurs espèces d'atomes et d'ions refroidis a aussi été mesurée récemment, et que de nouvelles valeurs améliorées, et présentant des incertitudes réduites de manière significative, d'un certain nombre d'étalons de fréquence optique fondés sur des cuves à gaz ont été déterminées, y compris dans le domaine des longueurs d'ondes pour les télécommunications optiques ;
- que les nouvelles techniques de peigne à impulsions femtosecondes ont un intérêt manifeste pour relier la fréquence des étalons de fréquence optique très stables à celle des étalons de fréquence utilisés pour la réalisation de la seconde du Système international d'unités (SI), que ces techniques de mesure sont un moyen commode pour assurer la traçabilité au SI et peuvent fournir aussi bien des sources de fréquence que des techniques de mesure ;

reconnaît que les techniques de peigne arrivent au moment opportun et sont appropriées, et recommande de poursuivre les recherches pour étudier leurs possibilités ;

accueille favorablement les essais de validation en cours des techniques de peigne effectués par comparaison avec les autres techniques de chaînes de fréquence ;

encourage les laboratoires nationaux de métrologie et les autres laboratoires à poursuivre les études sur les techniques de peigne au plus haut niveau d'exactitude possible et à rechercher la simplicité pour encourager leur mise en pratique la plus étendue ;

recommande

- que la liste des radiations recommandées donnée par le CIPM en 1997 (Recommandation 1 (CI-1997)) soit remplacée par la liste de radiations ci-dessous, qui inclut ;
 - des valeurs mises à jour de la fréquence des atomes de calcium et d'hydrogène refroidis et de l'ion piégé de strontium,
 - la valeur de la fréquence de nouvelles espèces d'ions refroidis, y compris de l'ion piégé de Hg^+ , de l'ion piégé d' In^+ , et de l'ion piégé d' Yb^+ ,

- des valeurs mises à jour de la fréquence de lasers asservis sur le rubidium, de lasers à grenat d'yttrium-aluminium dopé au néodyme (Nd:YAG) et de lasers à hélium-néon (He-Ne) asservis sur l'iode, de lasers à hélium-néon asservis sur le méthane, et de lasers à dioxyde de carbone asservis sur le tétr oxyde d'osmium à 10 μm ,
- des valeurs de la fréquence d'étalons pour les télécommunications optiques, y compris les lasers asservis sur le rubidium et l'acétylène.

**Liste des radiations recommandées pour la réalisation du mètre
approuvées par le CIPM en 2002 : fréquences et longueurs d'onde
dans le vide**

Cette liste remplace celles qui avaient été publiées dans *BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1983, **51**, 25-28, 1992, **60**, 23-27, 1997, **65**, 61-71, et dans *Metrologia*, 1984, **19**, 165-166, 1993-1994, **30**, 523-525, et 1999, **36**, 211-215.

Dans cette liste, les valeurs de la fréquence f et de la longueur d'onde λ devraient être rigoureusement liées par la relation $\lambda f = c_0$, avec $c_0 = 299\,792\,458$ m/s, mais les valeurs de λ sont arrondies.

Les résultats de mesures qui ont été utilisés pour la compilation de cette liste, et leur analyse, sont donnés dans l'annexe L 2 du rapport du Comité consultatif des longueurs (CCL) : Données utilisées pour établir la liste des radiations recommandées, 2001.

Il faut noter que, pour plusieurs de ces radiations recommandées, nous ne disposons que de peu de valeurs indépendantes ; il en résulte que les incertitudes estimées peuvent ne pas refléter toutes les sources de variations possibles.

Chacune de ces radiations peut être remplacée, sans perte d'exactitude, par une radiation correspondant à une autre composante de la même transition, ou par une autre radiation, lorsque la différence de fréquence correspondante est connue avec une exactitude suffisante. De telles radiations sont données dans l'annexe L 3 du rapport du CCL : Fréquences absolues d'autres transitions proches de transitions recommandées et intervalles de fréquence entre transitions et composantes hyperfines.

Il faut aussi noter que, pour obtenir les incertitudes données dans cette liste, il n'est pas suffisant de remplir les conditions requises pour les paramètres mentionnés ; il faut en outre respecter les conditions expérimentales considérées comme les plus appropriées selon la méthode d'asservissement utilisée. Celles-ci sont décrites dans de nombreuses publications scientifiques

ou techniques. Des exemples de conditions expérimentales considérées comme convenables pour telle ou telle radiation sont décrits dans des publications dont les références peuvent être obtenues auprès des laboratoires membres du CCL⁽¹⁾ ou auprès du BIPM.

1 Radiations recommandées de lasers asservis

1.1 Ion absorbant $^{115}\text{In}^+$, transition $5s^2\ ^1S_0 - 5s5p\ ^3P_0$

Les valeurs $f = 1\,267\,402\,452\,899,92\text{ kHz}$

$$\lambda = 236\,540\,853,549\,75\text{ fm}$$

sont accompagnées d'une incertitude-type relative de $3,6 \times 10^{-13}$.

1.2 Atome absorbant ^1H , transition $1S-2S$ à deux photons

Les valeurs $f = 1\,233\,030\,706\,593,55\text{ kHz}$

$$\lambda = 243\,134\,624,626\,04\text{ fm}$$

avec une incertitude-type relative de $2,0 \times 10^{-13}$, s'appliquent à une fréquence laser asservie sur la transition à deux photons dans un faisceau d'hydrogène refroidi ; les valeurs sont corrigées pour les ramener à une puissance laser nulle et pour tenir compte du déplacement Doppler de second ordre, ce qui ramène à des atomes réellement stationnaires.

1.3 Ion absorbant $^{199}\text{Hg}^+$, transition $5d^{10}6s\ ^2S_{1/2} (F=0) - 5d^96s^2\ ^2D_{5/2} (F=2)$ $\Delta m_F = 0$

Les valeurs $f = 1\,064\,721\,609\,899\,143\text{ Hz}$

$$\lambda = 281\,568\,867,591\,969\text{ fm}$$

avec une incertitude-type relative de $1,9 \times 10^{-14}$, sont corrigées pour tenir compte du déplacement de Zeeman de second ordre.

⁽¹⁾ Lors de sa session de 1997, le CIPM a changé le nom du Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM), qui est devenu le Comité consultatif des longueurs (CCL).

1.4 Ion absorbant $^{171}\text{Yb}^+$, transition $6s\ ^2S_{1/2} (F=0, m_F=0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F=2, m_F=0)$

Les valeurs $f = 688\,358\,979\,309\,312\text{ Hz}$

$\lambda = 435\,517\,610,739\,69\text{ fm}$

sont accompagnées d'une incertitude-type relative de $2,9 \times 10^{-14}$.

1.5 Ion absorbant $^{171}\text{Yb}^+$, transition $^2S_{1/2} (F=0, m_F=0) - ^2F_{7/2} (F=3, m_F=0)$

Les valeurs $f = 642\,121\,496\,772,6\text{ kHz}$

$\lambda = 466\,878\,090,061\text{ fm}$

avec une incertitude-type relative de $4,0 \times 10^{-12}$, sont corrigées pour tenir compte du déplacement de Stark en courant alternatif et du déplacement de Zeeman de second ordre.

1.6 Molécule absorbante $^{127}\text{I}_2$, composante a_{10} , transition⁽²⁾ R(56) 32-0

Les valeurs $f = 563\,260\,223\,513\text{ kHz}$

$\lambda = 532\,245\,036,104\text{ fm}$

avec une incertitude-type relative de $8,9 \times 10^{-12}$, s'appliquent à la radiation d'un laser à Nd:YAG doublée en fréquence, le laser étant asservi à l'aide d'une cuve à iode, située à l'extérieur du laser, ayant un point froid à la température de -15 °C .

1.7 Molécule absorbante $^{127}\text{I}_2$, composante a_{16} (ou f), transition R(127) 11-5

Les valeurs $f = 473\,612\,353\,604\text{ kHz}$

$\lambda = 632\,991\,212,58\text{ fm}$

avec une incertitude-type relative de $2,1 \times 10^{-11}$, s'appliquent à la radiation d'un laser à He-Ne, avec une cuve à iode située à l'intérieur du laser, asservi à l'aide de la technique de détection du troisième harmonique, lorsque les conditions suivantes sont respectées :

⁽²⁾ Toutes les transitions de I_2 se réfèrent à partir de maintenant au système $\text{B}^3\Pi\,0_u^+ - \text{X}^1\Sigma_g^+$.

- température des parois de la cuve $(25 \pm 5) ^\circ\text{C}$ ⁽³⁾ ;
- point froid à la température de $(15,0 \pm 0,2) ^\circ\text{C}$;
- largeur de modulation de fréquence, crête à creux $(6,0 \pm 0,3) \text{ MHz}$;
- puissance transportée par le faisceau dans un seul sens à l'intérieur de la cavité (c'est-à-dire puissance de sortie divisée par le facteur de transmission du miroir de sortie) : $(10 \pm 5) \text{ mW}$ pour une valeur absolue du coefficient de décalage de fréquence due à la puissance $\leq 1,0 \text{ kHz/mW}$.

Ces conditions ne suffisent pas par elles-mêmes à garantir l'obtention de l'incertitude-type indiquée. Il faut en outre que le système optique et l'électronique d'asservissement fonctionnent avec les performances appropriées. La cuve à iode peut aussi être utilisée dans des conditions moins rigoureuses, ce qui conduit à l'incertitude plus grande donnée dans l'annexe L 2 du rapport du CCL.

1.8 Atome absorbant ^{40}Ca , transition $^1\text{S}_0^3\text{P}_1$; $\Delta m_J = 0$

Les valeurs $f = 455\,986\,240\,494\,150 \text{ Hz}$

$$\lambda = 657\,459\,439,291\,67 \text{ fm}$$

avec une incertitude-type relative de $1,1 \times 10^{-13}$, s'appliquent à la radiation d'un laser asservi à l'aide d'atomes de calcium. Les valeurs correspondent à la fréquence moyenne des deux composantes de recul d'atomes réellement stationnaires, c'est-à-dire qu'elles sont corrigées pour tenir compte du déplacement Doppler de second ordre.

1.9 Ion absorbant $^{88}\text{Sr}^+$, transition $5^2\text{S}_{1/2} - 4^2\text{D}_{5/2}$

Les valeurs $f = 444\,779\,044\,095,5 \text{ kHz}$

$$\lambda = 674\,025\,590,8631 \text{ fm}$$

avec une incertitude-type relative de $7,9 \times 10^{-13}$, s'appliquent à la radiation d'un laser asservi sur la transition que l'on observe à l'aide d'un ion de strontium piégé et refroidi. Les valeurs correspondent au centre du multiplet Zeeman.

⁽³⁾ Pour la spécification des conditions de fonctionnement, telles que la température, la largeur de modulation et la puissance laser, les symboles \pm font référence à la tolérance et non à l'incertitude.

1.10 Atome absorbant ^{85}Rb , transition $5S_{1/2} (F_g = 3) - 5D_{5/2} (F_e = 5)$ à deux photons

Les valeurs $f = 385\,285\,142\,375\text{ kHz}$

$\lambda = 778\,105\,421,23\text{ fm}$

avec une incertitude-type relative de $1,3 \times 10^{-11}$, s'appliquent à la radiation d'un laser asservi sur le centre de la transition à deux photons. Les valeurs s'appliquent à une cuve à rubidium à une température inférieure à $100\text{ }^\circ\text{C}$; elles sont corrigées pour une puissance laser nulle.

1.11 Molécule absorbante $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$, transition P(16) (v_1+v_3)

Les valeurs $f = 194\,369\,569,4\text{ MHz}$

$\lambda = 1\,542\,383\,712\text{ fm}$

avec une incertitude-type relative provisoire de $5,2 \times 10^{-10}$, s'appliquent à la radiation d'un laser asservi à l'aide d'une cuve à $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$, située à l'extérieur du laser, dont la pression est comprise entre 1,3 Pa et 5,3 Pa.

1.12 Molécule absorbante CH_4 , composante $F_2^{(2)}$, transition P(7) v_3

1.12.1 Les valeurs $f = 88\,376\,181\,600,18\text{ kHz}$

$\lambda = 3\,392\,231\,397,327\text{ fm}$

avec une incertitude-type relative de 3×10^{-12} , s'appliquent à la radiation d'un laser à He-Ne asservi sur la composante centrale, transition (7-6), du triplet de la structure hyperfine résolue. Les valeurs correspondent à la fréquence moyenne des deux composantes de recul de molécules réellement stationnaires, c'est-à-dire qu'elles sont corrigées pour tenir compte du déplacement Doppler se second ordre.

1.12.2 Les valeurs $f = 88\,376\,181\,600,5\text{ kHz}$

$\lambda = 3\,392\,231\,397,31\text{ fm}$

avec une incertitude-type relative de $2,3 \times 10^{-11}$, s'appliquent à la radiation d'un laser à He-Ne asservi sur le centre de la structure hyperfine non résolue d'une cuve à méthane, située à l'intérieur ou à l'extérieur du laser, maintenue à la température ambiante, lorsque les conditions suivantes sont respectées:

- pression du méthane $\leq 3\text{ Pa}$;

- puissance surfacique moyenne transportée par le faisceau dans un seul sens à l'intérieur de la cavité (c'est-à-dire puissance surfacique de sortie divisée par le facteur de transmission du miroir de sortie), $\leq 10^4 \text{ W m}^{-2}$;
- rayon de courbure des surfaces d'onde $\geq 1 \text{ m}$;
- différence relative de puissance entre les deux ondes qui se propagent en sens inverse l'une de l'autre $\leq 5 \%$;
- récepteur d'asservissement placé à la sortie du dispositif du côté du tube du laser.

1.13 Molécule absorbante OsO_4 , transition en coïncidence avec la raie laser $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$, R(10) (00⁰1) – (10⁰0)

Les valeurs $f = 29\,054\,057\,446\,579 \text{ Hz}$

$\lambda = 10\,318\,436\,884,460 \text{ fm}$

avec une incertitude-type relative de $1,4 \times 10^{-13}$, s'appliquent à la radiation d'un laser à dioxyde de carbone asservi à l'aide d'une cuve à tétraoxyde d'osmium, située à l'extérieur du laser, à une pression inférieure à 0,2 Pa. Cette raie laser a été choisie parce qu'elle est moins sensible aux variations de pression et aux autres effets, comparée à la raie laser R(12) choisie précédemment.

2 Valeurs recommandées de radiations de lampes spectrales et autres sources

2.1 Radiation de la lampe spectrale de ^{86}Kr , transition $5d_5 - 2p_{10}$

La valeur $\lambda = 605\,780\,210,3 \text{ fm}$

avec une incertitude élargie relative $U = 3,9 \times 10^{-9}$, $U = k u_c$ ($k = 3$), u_c étant l'incertitude-type composée, s'applique à la radiation émise par une lampe à décharge. La radiation du ^{86}Kr est émise par une lampe à décharge à cathode chaude, contenant du ^{86}Kr d'une pureté meilleure que 99 %, en quantité suffisante pour assurer la présence de krypton solide à la température de 64 K, cette lampe étant munie d'un capillaire ayant un diamètre intérieur de 2 mm à 4 mm et une épaisseur de paroi de 1 mm environ.

On estime que la longueur d'onde de la radiation émise par la décharge de l'anode est égale, à 1×10^{-8} près en valeur relative, à la longueur d'onde correspondant à la transition entre les niveaux non perturbés, quand les conditions suivantes sont respectées :

- le capillaire est observé en bout de façon que les rayons lumineux utilisés cheminent du côté cathodique vers le côté anodique ;
- la partie inférieure de la lampe, y compris le capillaire, est immergée dans un bain réfrigérant maintenu à la température du point triple de l'azote, à 1 degré près ;
- la densité du courant dans le capillaire est $(0,3 \pm 0,1) \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$.

2.2 Radiations des lampes spectrales de ^{86}Kr , ^{198}Hg et ^{114}Cd

Longueurs d'onde dans le vide, λ , de transitions de ^{86}Kr , ^{198}Hg et ^{114}Cd

| Atome | Transition | λ / pm |
|-------------------|-------------------|----------------|
| ^{86}Kr | $2p_9 - 5d'_4$ | 645 807,20 |
| ^{86}Kr | $2p_8 - 5d_4$ | 642 280,06 |
| ^{86}Kr | $1s_3 - 3p_{10}$ | 565 112,86 |
| ^{86}Kr | $1s_4 - 3p_8$ | 450 361,62 |
| ^{198}Hg | $6^1P_1 - 6^1D_2$ | 579 226,83 |
| ^{198}Hg | $6^1P_1 - 6^3D_2$ | 577 119,83 |
| ^{198}Hg | $6^3P_2 - 7^3S_1$ | 546 227,05 |
| ^{198}Hg | $6^3P_1 - 7^3S_1$ | 435 956,24 |
| ^{114}Cd | $5^1P_1 - 5^1D_2$ | 644 024,80 |
| ^{114}Cd | $5^3P_2 - 6^3S_1$ | 508 723,79 |
| ^{114}Cd | $5^3P_1 - 6^3S_1$ | 480 125,21 |
| ^{114}Cd | $5^3P_0 - 6^3S_1$ | 467 945,81 |

Pour le ^{86}Kr , les valeurs ci-dessus s'appliquent, avec une incertitude élargie relative $U = 2 \times 10^{-8}$, $U = ku_c$ ($k = 3$), aux radiations émises par une lampe opérant dans des conditions similaires à celles mentionnées à la section 2.1.

Pour le ^{198}Hg , les valeurs ci-dessus s'appliquent, avec une incertitude élargie relative $U = 5 \times 10^{-8}$, $U = ku_c$ ($k = 3$), aux radiations émises par une lampe à décharge, quand les conditions suivantes sont respectées:

- les radiations sont produites au moyen d'une lampe à décharge sans électrode contenant du ^{198}Hg , d'une pureté meilleure que 98 %, et de l'argon à une pression comprise entre 0,5 mm Hg et 1,0 mm Hg (66 Pa à 133 Pa) ;

- le diamètre intérieur du capillaire de la lampe est d'environ 5 mm, et les radiations sont observées en travers ;
- la lampe est excitée par un champ à haute fréquence de puissance modérée ; elle est maintenue à une température inférieure à 10 °C ;
- le volume de la lampe est de préférence supérieur à 20 cm³.

Pour le ¹¹⁴Cd, les valeurs ci-dessus s'appliquent, avec une incertitude élargie relative $U = 7 \times 10^{-8}$, $U = ku_c$ ($k = 3$), aux radiations émises par une lampe à décharge, quand les conditions suivantes sont respectées:

- les radiations sont produites au moyen d'une lampe à décharge sans électrode contenant du ¹¹⁴Cd, d'une pureté meilleure que 95 %, et de l'argon à une pression de 1 mm Hg (133 Pa) environ à la température ambiante ;
- le diamètre intérieur du capillaire de la lampe est d'environ 5 mm, et les radiations sont observées en travers ;
- la lampe est excitée par un champ à haute fréquence de puissance modérée ; elle est maintenue à une température telle que la raie verte ne soit pas renversée.

2.3 Molécule absorbante ¹²⁷I₂, composante a₃, transition P(13) 43-0

Les valeurs $f = 582\,490\,603,38$ MHz

$$\lambda = 514\,673\,466,4 \text{ fm}$$

avec une incertitude-type relative de $2,5 \times 10^{-10}$, s'appliquent à la radiation d'un laser à Ar⁺ asservi à l'aide d'une cuve à iode, située à l'extérieur du laser, ayant un point froid à la température de (-5 ± 2) °C.

2.4 Molécule absorbante ¹²⁷I₂, composante a₉, transition R(12) 26-0

Les valeurs $f = 551\,579\,482,97$ MHz

$$\lambda = 543\,516\,333,1 \text{ fm}$$

avec une incertitude-type relative de $2,5 \times 10^{-10}$, s'appliquent à la radiation d'un laser à He-Ne asservi en fréquence à l'aide d'une cuve à iode, située à l'extérieur du laser, ayant un point froid à la température de (0 ± 2) °C.

2.5 Molécule absorbante $^{127}\text{I}_2$, composante a_1 , transition P(62) 17-1

Les valeurs $f = 520\,206\,808,4\text{ MHz}$

$$\lambda = 576\,294\,760,4\text{ fm}$$

avec une incertitude-type relative de 4×10^{-10} , s'appliquent à la radiation d'un laser à colorant (ou d'un laser à He-Ne doublé en fréquence) asservi à l'aide d'une cuve à iode, située à l'intérieur ou à l'extérieur du laser, ayant un point froid à la température de $(6 \pm 2)^\circ\text{C}$.

2.6 Molécule absorbante $^{127}\text{I}_2$, composante a_7 , transition R(47) 9-2

Les valeurs $f = 489\,880\,354,9\text{ MHz}$

$$\lambda = 611\,970\,770,0\text{ fm}$$

avec une incertitude-type relative de 3×10^{-10} , s'appliquent à la radiation d'un laser à He-Ne laser asservi à l'aide d'une cuve à iode, située à l'intérieur ou à l'extérieur du laser, ayant un point froid à la température de $(-5 \pm 2)^\circ\text{C}$.

2.7 Molécule absorbante $^{127}\text{I}_2$, composante a_9 , transition P(10) 8-5

Les valeurs $f = 468\,218\,332,4\text{ MHz}$

$$\lambda = 640\,283\,468,7\text{ fm}$$

avec une incertitude-type relative de $4,5 \times 10^{-10}$, s'appliquent à la radiation d'un laser à He-Ne asservi à l'aide d'une cuve à iode, ayant un point froid à la température de $(16 \pm 1)^\circ\text{C}$, et une largeur de modulation de fréquence, crête à creux, de $(6 \pm 1)\text{ MHz}$.

ANNEXE L 1.**Documents de travail présentés à la 10^e session du CCL**

Ces documents de travail peuvent être obtenus dans leur langue originale sur demande adressée au BIPM.

Document
CCL/

- 01-01 BIPM. — Questionnaire, 5 p.
- 01-01a BIPM. — List of answers, 1 p.
- 01-01b BIPM. — Summary of responses to the questionnaire, 1 p.
- 01-01c BIPM. — Participant list, 5 p.
- 01-01d BIPM. — Summary of all the answers of the laboratories, 70 p.
- 01-02 NIM (Chine). — Answer to the questionnaire, 3 p.
- 01-03 MIKES (Finlande). — Answer to the questionnaire, 5 p.
- 01-04 CMI (Rép. tchèque). — Answer to the questionnaire, 6 p.
- 01-05 VNIIM (Féd. de Russie). — Answer to the questionnaire, 4 p.
- 01-06 SPRING (Singapour). — Answer to the questionnaire, 4 p.
- 01-07 NMi VSL (Pays-Bas). — Answer to the questionnaire, 3 p.
- 01-08 KRISS (Rép. de Corée). — Answer to the questionnaire, 4 p.
- 01-09 UME (Turquie). — Answer to the questionnaire, 4 p.
- 01-10 NPL (Royaume-Uni). — Answer to the questionnaire, 5 p.
- 01-11 VNIIFTRI (Féd. de Russie). — Answer to the questionnaire, 2 p.
- 01-12 NMIJ/AIST (Japon). — Answer to the questionnaire, 13 p.
- 01-13 METAS (Suisse). — Answer to the questionnaire, 2 p.
- 01-14 PTB (Allemagne). — Answer to the questionnaire, 7 p.
- 01-15 IMGC (Italie). — Answer to the questionnaire, 4 p.
- 01-16 CSIRO (Australie). — Answer to the questionnaire, 3 p.
- 01-17 SMU (Slovaquie). — Answer to the questionnaire, 5 p.
- 01-18 CENAM (Mexique). — Answer to the questionnaire, 4 p.
- 01-19 NRC (Canada). — Answer to the questionnaire, 13 p.
- 01-20 CSIR (Afrique du Sud). — Answer to the questionnaire, 4 p.

Document
CCL/

- 01-21 CEM (Espagne). — Answer to the questionnaire, 3 p.
- 01-22 NIST/JILA (États-Unis). — Answer to the questionnaire, 9 p.
- 01-23 BIPM. — Answer to the questionnaire, 8 p.
- 01-24 METAS (Suisse). — Comparison CCL-Nano4 Appendix B1, 4 p.
- 01-25 METAS (Suisse). — WGDM-7 Preliminary comparison on nanometrology Nano4: 1D gratings, Draft B report - Appendix B1, F. Meli, 34 p.

ANNEXE L 2.**Données utilisées pour établir la liste des radiations
recommandées, 2001**

Cette annexe figure uniquement en anglais, *voir* page 127.

ANNEXE L 3.

Fréquences absolues d'autres transitions proches de certaines des transitions recommandées et intervalles de fréquence entre transitions et composantes hyperfines

Cette annexe figure uniquement en anglais, voir page 149.

ANNEXE L 4.

Références

Cette annexe figure uniquement en anglais, *voir* page 189.

LISTE DES SIGLES UTILISÉS DANS LE PRÉSENT VOLUME

1 Sigles des laboratoires, commissions et conférences

| | |
|----------|--|
| AIST* | National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, <i>voir</i> NMIJ/AIST |
| BIPM | Bureau international des poids et mesures |
| BNM | Bureau national de métrologie, Paris (France) |
| BNM-INM | Bureau national de métrologie, Institut national de métrologie, Paris (France) |
| BNM-LPTF | Bureau national de métrologie, Laboratoire primaire du temps et des fréquences, Paris (France) |
| 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 |
| CCL | (ex CCDM) Comité consultatif des longueurs |
| CCTF | (ex CCDS) Comité consultatif du temps et des fréquences |
| CEM | Centro Español de Metrología, Madrid (Espagne) |
| CENAM | Centro Nacional de Metrología, Mexico (Mexique) |
| CGPM | Conférence générale des poids et mesures |
| CIPM | Comité international des poids et mesures |
| CMI | Český Metrologický Institut/Czech Metrological Institute, Prague et Brno (Rép. tchèque) |
| COOMET | Cooperation in Metrology among the Central European Countries |
| CSIR-NML | Council for Scientific and Industrial Research, National Metrology Laboratory, Pretoria (Afrique du Sud) |
| CSIRO* | <i>voir</i> NML CSIRO |
| DFM | Danish Institute of Fundamental Metrology, Lyngby (Danemark) |
| DG | Groupe de discussion/Discussion Group |
| EUROMET | European Collaboration in Measurement Standards |
| IMGC | Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Turin (Italie) |

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

| | |
|-----------|---|
| IMGC-CNR | Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Turin (Italie) |
| INM* | Institut national de métrologie, Paris (France), <i>voir</i> BNM-INM |
| ISO | Organisation internationale de normalisation |
| JCRB | Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM/Joint Committee of the Regional Metrology Organizations and the BIPM |
| JILA | Joint Institute for Laboratory Astrophysics, Boulder CO (États-Unis) |
| KRISS | Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon (Rép. de Corée) |
| LPTF* | Laboratoire primaire du temps et des fréquences, Paris (France), <i>voir</i> BNM-LPTF |
| METAS | (ex OFMET) Office fédéral de métrologie et d'accréditation, Wabern (Suisse) |
| MIKES | Mittatekniikan Keskus/Centre for Metrology and Accreditation, Helsinki (Finlande) |
| MRA | Arrangement de reconnaissance mutuelle/Mutual Recognition Arrangement |
| NIM | Institut national de métrologie, Beijing (Chine) |
| NIST | 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) |
| NML CSIRO | National Measurement Laboratory, CSIRO, Lindfield (Australie) |
| NML | <i>voir</i> CSIR |
| NPL | National Physical Laboratory, Teddington (Royaume-Uni) |
| NRC | Conseil national de recherches du Canada, Ottawa (Canada) |
| NRLM* | National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba (Japon), <i>voir</i> NMIJ/AIST |
| OFMET* | Office fédéral de métrologie/Eidgenössisches Amt für Messwesen, Wabern (Suisse), <i>voir</i> METAS |

| | |
|----------|---|
| PSB* | Singapore Productivity and Standards Board, Singapour (Singapour), <i>voir</i> SPRING |
| PTB | Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig et Berlin (Allemagne) |
| SMU | Slovenský Metrologický Ústav/Slovak Institute of Metrology, Bratislava (Slovaquie) |
| SPRING | (ex PSB) Standards, Productivity and Innovation Board, Singapour (Singapour) |
| UME | Ulusal Metroloji Enstitüsü/National Metrology Institute, Marmara Research Centre, Gebze-Kocaeli (Turquie) |
| VNIIFTRI | Institut des mesures physico-techniques et radio-techniques, Gosstandart de Russie, Moscou (Féd. de Russie) |
| VNIIM | Institut de métrologie D.I. Mendéléev, Gosstandart de Russie, Saint-Petersbourg (Féd. de Russie) |
| VNIIMS | Russian Research Institute for Metrological Service, Gosstandart de Russie, Moscou (Féd. de Russie) |
| VSL* | Van Swinden Laboratorium, Delft (Pays-Bas), <i>voir</i> NMi VSL |
| WGDM | Groupe de travail du CCL sur la métrologie dimensionnelle/CCL Working Group on Dimensional Metrology |

2 Sigles des termes scientifiques

| | |
|------|---|
| CMC | Aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages/ Calibration and Measurement Capabilities |
| CMM | Machines à mesurer les coordonnées/Coordinate Measuring Machine |
| GPS | Global Positioning System |
| KCDB | Base de données du BIPM sur les comparaisons clés/ BIPM Key Comparison Database |
| SI | Système international d'unités |