

Bureau international des poids et mesures

Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM)

9^e session (septembre 1997)

Note sur l'utilisation du texte anglais (*voir* page 59)

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

ISSN 0253-2182
ISBN 92-822-2167-9

TABLE DES MATIÈRES

Photographie des participants à la 9^e session du Comité consultatif pour la définition du mètre **2**

États membres de la Convention du Mètre **7**

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

Liste des membres du Comité consultatif pour la définition du mètre **13**

Rapport au Comité international des poids et mesures, par N. Brown 15

Ordre du jour **16**

1 Ouverture de la session ; nomination d'un rapporteur **17**

2 Équivalence des étalons nationaux de mesure **18**

3 Examen des réponses au questionnaire du Bureau international **18**

4 Présentation de nouveaux résultats en réponse au questionnaire **19**

5 Modifications à la mise en pratique de 1992 et propositions de nouvelles radiations recommandées **20**

5.1 Propositions du groupe de travail **20**

5.2 Discussion des propositions **21**

5.3 Groupe de travail chargé de proposer au Comité international la recommandation finale **22**

6 Rapport du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle **23**

7 Identification des comparaisons clés dans le domaine de la métrologie des longueurs **24**

7.1 Comparaisons proposées **24**

7.2 Participation aux comparaisons clés **25**

7.3 Rôle des comparaisons clés régionales **26**

7.4 Résultats de la comparaison de cales étalons du CCDM **26**

7.5 Comparaison clé de lasers asservis ; question de l'équivalence provisoire **27**

8 Travaux du Bureau international **27**

8.1 Comparaisons internationales de lasers asservis **27**

8.2 Travaux de recherche **28**

8.3 Nanométrie **28**

9 Groupes de travail du CCDM **29**

9.1 Groupe de travail sur la mise en pratique **29**

9.2 Formule pour la détermination de l'indice de réfraction **29**

9.3 Groupe de travail sur les travaux futurs **29**

- 10 Recommandations au Comité international **30**
 - 10.1 Pourquoi ces recommandations ? **30**
 - 10.2 Travaux futurs au Bureau international **30**
 - 10.3 Changement de nom du CCDM **31**
- 11 Date de la prochaine session **31**

Recommandations présentées au Comité international des poids et mesures

- M 1 (1997) : Révision de la mise en pratique de la définition du mètre **34**
- M 2 (1997) : Travaux futurs **35**

Recommandation adoptée par le Comité international des poids et mesures

- 1 (CI-1997) : Révision de la mise en pratique de la définition du mètre **38**

Annexes

- M 1. Documents de travail présentés à la 9^e session du CCDM **51**
- M 2. Données utilisées pour établir la liste des radiations recommandées, 1997, et bibliographie commentée **53**
- M 3. Fréquences absolues d'autres transitions proches de certaines des transitions recommandées et intervalles de fréquence entre transitions et composantes hyperfines **54**

Liste des sigles utilisés dans le présent volume 55

ÉTATS MEMBRES DE LA CONVENTION DU MÈTRE

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

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) et aux échelles de temps (1988). Dans ce but, un agrandissement des premiers laboratoires construits en 1876-1878 a eu lieu en 1929 ; de nouveaux bâtiments ont été construits en 1963-1964 pour les laboratoires de la section des rayonnements ionisants, en 1984 pour le travail sur les lasers et en 1988 a été inauguré un bâtiment pour la bibliothèque et des bureaux.

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

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

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

des membres nominativement désignés par le Comité international, et un représentant du Bureau international (Critères pour être membre des Comités consultatifs, *BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1996, **64**, 6). Ces Comités sont actuellement au nombre de neuf :

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 (CCQM), créé en 1993.

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

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

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

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

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

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

**LISTE DES MEMBRES
DU COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DU MÈTRE**

au 16 septembre 1997

Président

M. Chung Myung Sai, membre du Comité international des poids et mesures,
Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon.

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.

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

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield.

Institut de métrologie D.I. Mendéléev [VNIIM], Saint-Pétersbourg.

Institut national de métrologie [NIM], Beijing.

Istituto di Metrologia G. Colonnetti [IMGC], Turin.

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

National Institute of Standards and Technology [NIST], Gaithersburg/Joint

Institute for Laboratory Astrophysics [JILA], Boulder.

National Physical Laboratory [NPL], Teddington.

National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Tsukuba.

Office fédéral de métrologie [OFMET], Wabern.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig.

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

**Comité consultatif
pour la définition du mètre**

Rapport de la 9^e session

(16-18 septembre 1997)

au Comité international des poids et mesures

Ordre du jour

- 1 Ouverture de la session ; nomination d'un rapporteur.
- 2 Équivalence des étalons nationaux de mesure.
- 3 Examen des réponses au questionnaire du Bureau international.
- 4 Présentation de nouveaux résultats en réponse au questionnaire.
- 5 Modifications à la mise en pratique de 1992 et proposition de nouvelles radiations recommandées :
 - 5.1 Propositions du groupe de travail ;
 - 5.2 Discussion des propositions ;
 - 5.3 Groupe de travail chargé de proposer au Comité international la recommandation finale.
- 6 Rapport du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle.
- 7 Identification des comparaisons clés dans le domaine de la métrologie des longueurs :
 - 7.1 Comparaisons proposées ;
 - 7.2 Participation aux comparaisons clés ;
 - 7.3 Rôle des comparaisons clés régionales ;
 - 7.4 Résultats de la comparaison de cales étalons du CCDM ;
 - 7.5 Comparaison clé de lasers asservis ; question de l'équivalence provisoire.
- 8 Travaux du Bureau international :
 - 8.1 Comparaisons internationales de lasers asservis ;
 - 8.2 Travaux de recherche ;
 - 8.3 Nanométrie.
- 9 Groupes de travail du CCDM :
 - 9.1 Groupe de travail sur la mise en pratique ;
 - 9.2 Formule pour la détermination de l'indice de réfraction ;
 - 9.3 Groupe de travail sur les travaux futurs.
- 10 Recommandations au Comité international :
 - 10.1 Pourquoi ces recommandations ? ;
 - 10.2 Travaux futurs au Bureau international ;
 - 10.3 Changement de nom du CCDM.
- 11 Date de la prochaine session.

1 OUVERTURE DE LA SESSION ; NOMINATION D'UN RAPPORTEUR

Le Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM) a tenu sa 9^e session au Bureau international des poids et mesures (BIPM), à Sèvres ; cinq séances ont eu lieu les mardi 16, mercredi 17 et jeudi 18 septembre 1997.

Étaient présents : L.Y. Abramova (VNIIM), F. Bertinetto (IMGC), N. Brown (CSIRO-NML), M.S. Chung (président du CCDM), C.I. Eom (KRISS), P. Gill (NPL), J.L. Hall (JILA), J. Helmcke (PTB), P. Juncar (BNM-INM), H. Kunzmann (PTB), A. Madej (NRC), H. Matsumoto (NRLM), J. Pekelsky (NRC), M. Priel (BNM-INM), T.J. Quinn (directeur du BIPM), F. Riehle (PTB), W.R.C. Rowley (NPL), A. Sacconi (IMGC), S. Shen (NIM), J.A. Stone (NIST), R. Thalmann (OFMET), Y.G. Zakharenko (VNIIM).

Invités : J. Blabla (CMI), O. Krüger (CSIR), R. Muijlwijk (NMi-VSL), V. Navra-til (SMU), M. Okaji (NRLM), M. Viliesid (CENAM).

Assistaient aussi à la réunion : P. Giacomo (directeur honoraire du BIPM) ; J.-M. Chartier, R. Felder, S. Picard, L. Robertsson, L.F. Vitouchkine et A. Zarka (BIPM).

M. Quinn ouvre la session au nom du Bureau international et présente le nouveau président du CCDM. Il souligne que des décisions importantes devront être prises, comme par exemple les modifications à apporter à la mise en pratique de la définition du mètre et le choix des comparaisons clés, et que l'activité des groupes de travail est aussi à examiner.

Le président remercie le directeur du Bureau international et souhaite la bienvenue aux membres, en particulier à ceux qui assistent pour la première fois à une réunion du CCDM.

M. Brown est nommé rapporteur.

L'ordre du jour est approuvé sans changement.

2 ÉQUIVALENCE DES ÉTALONS NATIONAUX DE MESURE

M. Quinn explique qu'il est maintenant demandé aux Comités consultatifs d'identifier les comparaisons clés qui aideront à établir les bases des accords d'équivalence à venir entre laboratoires nationaux. Le CCDM est le dernier comité à examiner cette question et doit décider quelles sont les comparaisons clés qui permettent de vérifier les aptitudes d'un laboratoire de métrologie des longueurs. Ces comparaisons vont occasionner beaucoup de travail supplémentaire. Il est donc important de les choisir avec soin, sans rigueur excessive, et de considérer ces comparaisons comme un moyen d'établir le degré de compétence des laboratoires concernés. Les comparaisons ne doivent pas uniquement servir à vérifier les étalons primaires, mais aussi le travail du laboratoire en général, de façon à assurer la reconnaissance mutuelle des certificats d'étalonnage. Un grand nombre de décisions devront être prises avant d'établir et de se mettre d'accord sur des directives, mais ces décisions seront bientôt soumises à l'approbation du Comité international et devraient être finalisées d'ici un an. Il est important de commencer à établir le programme de comparaison lors de cette session et de nommer des laboratoires pilotes qui assureront la coordination des comparaisons clés entre les membres du Comité consultatif. Les comparaisons régionales devront être organisées de telle façon que chaque laboratoire national puisse y prendre part. De plus, elles doivent être reliées les unes aux autres sans redondance inutile. Le Comité consultatif devra approuver les résultats des comparaisons avant de les publier.

3 EXAMEN DES RÉPONSES AU QUESTIONNAIRE DU BUREAU INTERNATIONAL

M. Chartier résume les réponses au questionnaire envoyé par le Bureau international (CCDM/97-19). Six laboratoires ont effectué de nouvelles mesures de fréquence et proposent de les inclure dans la nouvelle mise en pratique de la définition du mètre. La majorité des laboratoires est favorable à la création de nouveaux groupes de travail. Tous les laboratoires membres ont pris part aux comparaisons internationales de lasers asservis et de métrologie dimensionnelle qui ont eu lieu depuis la précédente session du CCDM. M. Chartier conclut

qu'il est nécessaire de réviser la mise en pratique de 1992 pour y apporter les corrections nécessaires, mettre à jour la fréquence des lasers et ajouter plusieurs nouvelles radiations de lasers intéressantes.

4 PRÉSENTATION DE NOUVEAUX RÉSULTATS EN RÉPONSE AU QUESTIONNAIRE

Le NIST et le JILA rendent compte de la détermination de la fréquence d'un laser à Nd:YAG à fréquence doublée asservi sur la raie d'absorption de l'iode à 532 nm. Sa détermination la plus récente a été réalisée en mesurant la fréquence d'une transition du rubidium à deux photons au BNM-LPTF.

Le NPL présente les résultats récents obtenus avec des ions de strontium isolés et refroidis, travail parallèle à celui qui a été réalisé au NRC. On a pu observer des largeurs de raies inférieures à 1 kHz ; les mesures de fréquence effectuées dans les deux laboratoires sont en bon accord. L'exactitude de la fréquence est déjà proche de celle obtenue pour le laser asservi sur l'iode à 633 nm et elle devrait encore s'améliorer. Les mesures de fréquence d'un laser à Nd:YAG à fréquence doublée asservi sur l'iode viennent aussi de s'achever ; elles complètent les résultats présentés par le NIST et le JILA. Le large domaine de balayage en fréquence de ce laser, qui s'étend sur 8 ou 9 raies d'absorption, signifie que les utilisateurs peuvent travailler sur plusieurs raies différentes. Un certain nombre d'intervalles de fréquence entre ces raies ont été mesurés pour résoudre ce problème.

La PTB rend compte d'une nouvelle mesure de la fréquence d'un laser asservi sur le calcium. Ce laser utilise des atomes de calcium refroidis et piégés. La PTB propose d'inclure ce résultat dans la nouvelle mise en pratique, ainsi que la nouvelle mesure de la fréquence de la transition 1S-2S à deux photons de l'atome d'hydrogène, effectuée au MPQ. Une mesure de la fréquence d'une transition de l'iode moléculaire à 815 nm a été réalisée en mesurant la différence de fréquence entre le laser asservi sur le calcium et un laser à He-Ne asservi sur le méthane.

Le NRC rend compte de travaux en cours sur des ions isolés de baryum ou de strontium. La fréquence du système fondé sur le baryum a été mesurée avec la chaîne de fréquence fondée essentiellement sur des lasers à CO₂ ; la fréquence

du système fondé sur des ions de strontium a été mesurée par rapport à un laser à He-Ne asservi sur l'iode à 633 nm. Une comparaison préliminaire, réalisée par rapport à la fréquence d'une horloge à césium, permettra au NRC d'utiliser le système fondé sur le strontium comme étalon primaire pour la réalisation du mètre, ce qui peut conduire à effectuer des mesures absolues de lasers à 633 nm.

L'IMGC décrit une mesure de la fréquence de la transition de l'hélium à 389 nm au LENS, par comparaison à celle de la transition à deux photons d'un laser à rubidium étalonné précédemment à $2\lambda_0 \approx 778$ nm. En coopération avec le CSELT, l'IMGC a mesuré les longueurs d'onde de plusieurs transitions du C_2H_2 et du HI voisines de 1,5 μm , région spectrale importante pour les télécommunications. Un document sera bientôt publié sur les mesures effectuées avec un laser transportable CO_2/OsO_4 .

Le BNM-LPTF dit que le laser à 778 nm fondé sur la transition à deux photons dans le rubidium est un étalon très utile, car il est simple et transportable. Les mesures de fréquence sont actuellement limitées par la fréquence d'un laser à CO_2 à 29 THz, mais ce problème devrait être résolu à l'avenir.

Une discussion a lieu sur les besoins futurs de chaînes de fréquence fiables allant du domaine optique au domaine des micro-ondes et capables de fonctionner sur de longues périodes, dans l'éventualité où les étalons optiques viendraient à remplacer les horloges à césium actuelles.

5 MODIFICATIONS À LA MISE EN PRATIQUE DE 1992 ET PROPOSITIONS DE NOUVELLES RADIATIONS RECOMMANDÉES

5.1 Propositions du groupe de travail

Le président du Groupe de travail sur la mise en pratique de la définition du mètre présente le document intitulé « Proposal to the 1997 CCDM » (CCDM/97-25). M. Quinn explique qu'il s'agit des conclusions d'un petit groupe de travail informel qui s'est réuni deux semaines auparavant pour étudier de nouvelles fréquences pour la mise en pratique.

M. Gill, qui préside ce groupe de travail, propose d'apporter trois changements à la mise en pratique : 1) ajouter, dans l'introduction, la définition du mètre et

les trois méthodes pour sa réalisation, 2) réviser la fréquence donnée actuellement à la raie du calcium et 3) ajouter cinq nouvelles radiations à la liste des radiations recommandées.

Les autres propositions de ce groupe concernent le retrait éventuel de deux radiations peu usitées (576 nm et 640 nm), la publication des valeurs recommandées pour les lampes spectrales, le souhait de disposer de nouvelles fréquences de référence pour les télécommunications, la création d'une base de données sur les raies spectrales, et la création d'un groupe de travail officiel chargé de poursuivre ces activités pour les prochaines sessions du CCDM.

5.2 Discussion des propositions

Le CCDM approuve ces propositions. MM. Hall, Gill et Madej remarquent qu'une nouvelle détermination de la radiation à 532 nm devrait bientôt réduire son incertitude à 5 kHz et que le rapport signal-sur-bruit élevé du signal d'asservissement de ce laser l'a rendu populaire dans de nombreux laboratoires qui mettent au point des lasers. Le laser fondé sur la transition à deux photons dans le rubidium (778 nm) est séduisant parce qu'il est fondé sur des diodes laser et qu'il est transportable. La transition 1S-2S à deux photons dans l'hydrogène constitue la référence de la plus haute exactitude pour les courtes longueurs d'onde (243 nm). Le laser à CO₂ asservi sur le tétraoxyde d'osmium (10 µm) joue un rôle pivot dans les chaînes de fréquence puisqu'il permet de relier l'infrarouge au visible. La suggestion faite précédemment d'inclure des lasers à He-Ne non asservis en tant que sources a été abandonnée, plusieurs personnes ayant fait remarquer que les raies d'émission à 633 nm et 640 nm peuvent être, et ont été, confondues. M. Hall note qu'il sera possible de mesurer une série de raies de l'acétylène allant de 778 nm à 800 nm et qu'il sera nécessaire de disposer d'un système simple, permettant d'accéder au nombre élevé de mesures de fréquences qui deviendront ainsi disponibles. L'éventualité de créer un site Web et ses conséquences sont discutées.

M. Rowley soulève une objection à la proposition, majoritaire, d'ajouter un paragraphe sur la relativité dans la mise en pratique. M. Hall se joint à lui et suggère de placer ce paragraphe en annexe. On procède à un vote pour déterminer qui est favorable à déplacer le paragraphe sur la relativité générale en annexe : cette proposition recueille treize voix pour, une voix contre et une abstention.

5.3 Groupe de travail chargé de proposer au Comité international la recommandation finale

Le président forme un petit groupe de travail chargé de réviser la liste des radiations recommandées. Il est demandé à M. Gill de présider ce groupe, dont les membres sont MM. Bertinotto, Chartier, Hall, Juncar, Madej et Riehle. Le groupe est chargé de préparer un projet sur les fréquences et les incertitudes des radiations à inclure dans la nouvelle mise en pratique.

M. Gill présente le premier projet. M. Riehle souligne que le Comité international a adopté une incertitude-type de 12 kHz pour la radiation à 633 nm, soit une incertitude-type relative de $2,5 \times 10^{-11}$. Il doit donc être précisé que c'est la technique de la dérivée troisième qui doit être utilisée pour asservir la fréquence de cette radiation. M. Helmcke demande d'ajouter qu'il s'agit de la longueur d'onde dans le vide. Les membres se préoccupent de la notation correcte pour les transitions qui correspondent aux radiations. Le groupe de travail accepte de traiter cette question avant la fin de cette réunion.

M. Gill présente un deuxième projet. La liste des radiations est divisée en deux groupes. Toutes les radiations ont le même statut quant à la réalisation du mètre. M. Rowley explique que cette division vise à séparer les étalons plus anciens des nouveaux. Les étalons les plus anciens sont de moins en moins employés, il n'est donc pas conseillé de fonder la construction de nouveaux équipements sur ces étalons. La liste de radiations de lasers asservis, qui fera partie de la Recommandation M 1 (1997), est mise aux voix. Elle est approuvée à l'unanimité.

Le président demande au Comité d'étudier l'introduction de la Recommandation M 1. Les recommandations proposées lors de la précédente session du CCDM (1992) étaient centrées sur les recherches à venir de nouvelles radiations. M. Pekelsky est favorable à préparer une déclaration pour soutenir les demandes de fonds affectées à la recherche fondamentale sur les étalons de fréquence. M. Helmcke demande d'inclure aussi une déclaration pour répondre aux exigences croissantes dans le domaine de la métrologie dimensionnelle. Un groupe de travail est formé pour rédiger un projet de recommandation. Le Comité approuve à l'unanimité le projet du groupe (Recommandation M 2).

6 RAPPORT DU GROUPE DE TRAVAIL SUR LA MÉTROLOGIE DIMENSIONNELLE

M. Pekelsky présente deux rapports du président du Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle intitulés « Chairman's report on 1st meeting of CCDM/WGDM » (CCDM/97-20) et « Chairman's report: activities to July 1997 » (CCDM/97-21). Il présente un transparent intitulé « Current key topics in dimensional metrology » qui mentionne sept points : 1) les cales étalons, 2) les règles, 3) les étalons d'angle, 4) les étalons de diamètre, 5) les étalons pour machines à mesurer, 6) la nanométrie et 7) la dilatation thermique. Il explique qu'il s'agit d'une liste minimale, et qu'il sera peut-être nécessaire d'ajouter d'autres points ultérieurement, comme par exemple les règles à traits. Le but de cette liste de sujets clés est de former de petits groupes de discussion qui aideront au choix des comparaisons clés. La préoccupation majeure est de savoir si ces comparaisons pourront offrir suffisamment d'informations sur les aptitudes d'un laboratoire pour permettre de faire une déclaration d'équivalence. M. Quinn explique qu'il faut choisir entre un nombre limité de comparaisons et une quantité de travail excessive ; les comparaisons clés ont seulement pour but de donner une confiance globale dans les aptitudes d'un laboratoire. M. Kunzmann souligne que ces comparaisons doivent former l'infrastructure sur laquelle viendront se greffer d'autres comparaisons, si nécessaire.

M. Pekelsky décrit le document « Guide criteria for identifying CCDM dimensional metrology key comparisons », qui subdivise ces critères en trois groupes :

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

le plus à l'incertitude de mesure, et ces laboratoires doivent être volontaires pour participer aux comparaisons régionales.

Sur la base de ces critères, le groupe de travail a identifié six comparaisons clés, qui devraient débiter d'ici trois ans. M. Pekelsky les résume à l'aide d'un troisième transparent. Il indique les comparaisons clés, le laboratoire pilote proposé et la date de début éventuelle :

- 1) cales étalons : OFMET, mars 1998 ;
- 2) règles : NPL, octobre 1999 ;
- 3) polygones optiques : CSIR, juillet 1998 ;
- 4) étalons de diamètre cylindriques : NIST, septembre 1998 ;
- 5) calibres à gradins et barres à boules pour machines à mesurer : PTB et NIST, mars 1998 ;
- 6) plaques à billes bi-dimensionnelles pour machines à mesurer : CENAM, janvier 2000.

M. Quinn félicite le groupe de travail pour son efficacité.

7 IDENTIFICATION DES COMPARAISONS CLÉS DANS LE DOMAINE DE LA MÉTROLOGIE DES LONGUEURS

7.1 Comparaisons proposées

Pour la comparaison de cales étalons, M. Thalmann propose de faire circuler 15 à 20 cales de matériaux différents, plus longues que celles utilisées lors de la précédente comparaison de cales étalons du CCDM. Les mesures doivent se limiter à la longueur médiane.

La comparaison de règles est examinée. Au cours de la discussion, M. Shen demande pourquoi les cales étalons et les règles sont placées dans des catégories différentes. M. Helmcke répond qu'elles ont toujours été considérées séparément par l'EUROMET parce que leurs formes peuvent être variées et que l'on utilise habituellement des techniques ou des instruments différents pour les mesurer. La température est un facteur critique pour les règles. Comme les

comparaisons clés doivent servir à vérifier l'aptitude des laboratoires et non leurs étalons, la distinction est justifiée.

Pour les polygones optiques, M. Krüger propose une comparaison clé fondée sur un polygone à 7 côtés et un polygone à 12 ou 24 côtés. Le polygone à 7 côtés pourrait être l'un de ceux utilisés habituellement dans les comparaisons de l'EUROMET, ce qui aurait l'avantage de faire le lien entre les deux comparaisons.

Les membres pensent que des bagues et tampons pourraient convenir à une comparaison clé d'étalons de diamètre, et que leur diamètre et leur forme devraient être mesurés.

M. Kunzmann propose de faire circuler au départ deux étalons linéaires pour une comparaison clé de machines à mesurer. La PTB coordonnera une comparaison clé de calibres à gradins et le NIST une comparaison de barres à boules. Les laboratoires peuvent participer au choix à l'une des comparaisons ou aux deux. Le but sera de mesurer l'étalon, et il n'est pas nécessaire pour cela de disposer d'une machine à mesurer. Cet exercice devra ensuite être effectué avec un étalon bi-dimensionnel, comme une plaque à billes, qui devra être mesuré à l'aide d'une machine à mesurer ; le CENAM en sera le laboratoire pilote.

Les participants approuvent ce programme et le choix des laboratoires pilotes.

7.2 Participation aux comparaisons clés

M. Quinn demande aux participants d'indiquer à main levée s'ils désirent participer aux comparaisons clés : le taux de participation potentiel est très élevé. Les comparaisons de cales étalons et de polygones intéressent tous les membres du Comité. Le CMI et le CSIR sont les seuls membres qui ne peuvent prendre part à la comparaison de règles. Le CMI, le KRISS et le SMU ne souhaitent pas participer à la comparaison d'étalons de diamètre. Le NMi et le SMU ne souhaitent pas prendre part aux comparaisons de machines à mesurer. Le CSIR ne participera pas à la comparaison de machines à mesurer les calibres à gradins et barres à boules et le VNIIM ne participera pas à la comparaison de machines à mesurer les plaques à billes.

M. Thalmann souligne qu'il sera impossible de gérer un aussi grand nombre de participants dans le cadre d'une seule comparaison. M. Quinn note que ce problème est spécifique à la métrologie dimensionnelle et que les autres Comités consultatifs ne rencontrent pas de problème de ce type. Quels que

soient les critères de sélection des participants à une comparaison clé, il ne serait toutefois pas approprié d'exclure des membres du CCDM si ce n'est pour des raisons techniques. Si le nombre de participants doit être limité pour effectuer la comparaison dans des délais raisonnables, il est nécessaire d'organiser deux comparaisons clés en parallèle.

7.3 Rôle des comparaisons clés régionales

M. Brown rappelle que le nombre des membres participant aux comparaisons clés du CCDM pourrait être réduit quand les comparaisons régionales seront organisées. Ces deux types de comparaisons ont le même statut et si elles se déroulaient en même temps, les comparaisons régionales constitueraient des alternatives utiles aux comparaisons clés du CCDM. Des laboratoires participant à la comparaison clé du CCDM devraient aussi prendre part à la comparaison clé de leur région pour effectuer le lien requis. Comme cela double l'effort, les laboratoires pourraient préférer simplement participer à la comparaison régionale. M. Kunzmann dit que les laboratoires pourraient être incités, sous une forte pression économique, à prendre part à la comparaison clé du CCDM, à moins qu'il ne soit stipulé expressément dans les directives relatives aux déclarations d'équivalence que les comparaisons clés du CCDM et celles des organisations régionales ont le même statut.

M. Quinn souligne l'intention de donner un statut équivalent aux comparaisons clés du CCDM et aux comparaisons régionales. Cela pourrait se faire en établissant des directives et des protocoles. Les laboratoires pilotes devraient consulter les autres laboratoires pour établir ces protocoles. La liste des composantes majeures de l'incertitude en est un élément essentiel et tous les participants doivent fournir cette information. Ils peuvent ajouter d'autres facteurs, mais les principales composantes doivent pouvoir être aisément comparées.

7.4 Résultats de la comparaison de cales étalons du CCDM

M. Thalmann présente les résultats de la dernière comparaison de cales étalons du CCDM afin d'obtenir l'accord du Comité pour les publier, conformément à l'esprit des comparaisons clés à venir. Deux laboratoires ont re-mesuré leur cale étalon et nous avons reçu les deux résultats. M. Quinn observe que les résultats révisés de ces deux laboratoires ne montrent pas de différence significative avec ceux des autres laboratoires, la seule critique que l'on puisse faire est qu'un seul laboratoire assure le lien avec les comparaisons régionales. M. Thalmann est

d'accord avec lui, et dit que cela devrait être modifié lors de la prochaine comparaison clé. Le CCDM approuve la publication des résultats.

7.5 Comparaison clé de lasers asservis ; question de l'équivalence provisoire

Le président soulève la question d'une éventuelle comparaison clé de lasers. M. Hall souligne qu'il pourrait y avoir des différences entre les étalons quantiques et l'étalon utilisé en métrologie dimensionnelle, si l'on ne met pas en œuvre un programme de comparaison. Il est toujours nécessaire que le laboratoire « se conforme à la meilleure réalisation possible quant aux méthodes d'asservissement », comme le stipule la mise en pratique. M. Rowley note que le laser à 633 nm satisfait toujours aux besoins de la métrologie dimensionnelle. M. Kunzmann souligne la nécessité éventuelle d'effectuer une comparaison clé de lasers secondaires asservis sur la courbe de gain de l'hélium-néon. Cette question est discutée mais les participants pensent que ce domaine pourrait être couvert en effectuant des comparaisons supplémentaires plutôt qu'en effectuant une comparaison clé. M. Helmcke observe que la situation pourrait changer quand les diodes laser seront utilisées comme sources pour les interféromètres, et il souligne que la procédure d'étalonnage pourrait ne pas être aussi simple. Il est décidé que le laser à He-Ne asservi sur l'iode à 633 nm reste l'étalon pour les comparaisons clés de lasers asservis.

M. Quinn souligne que les pressions économiques exercées pour répondre à la demande d'équivalence sont très fortes et il demande au Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle d'établir une liste des comparaisons déjà réalisées qui pourrait servir provisoirement pour les déclarations d'équivalence.

8 TRAVAUX DU BUREAU INTERNATIONAL

8.1 Comparaisons internationales de lasers asservis

M. Chartier présente des transparents montrant les comparaisons qui ont eu lieu depuis la précédente session du CCDM. L'activité principale concerne les lasers à He-Ne asservis sur l'iode à 633 nm : le Bureau international a participé à cinq comparaisons bilatérales et huit comparaisons groupées. Au total trente-quatre

laboratoires (parmi lesquels tous les laboratoires membres du CCDM) y ont participé. Pratiquement tous les résultats se situent dans les limites de l'incertitude donnée dans la mise en pratique. Ceux qui se situent hors de ces limites correspondent en général à une cuve à iode défectueuse ou à un problème d'électronique. Des comparaisons restreintes ont aussi été effectuées avec un laser à He-Ne asservi sur l'iode à 543 nm, avec un laser à Nd:YAG à fréquence doublée asservi sur l'iode à 532 nm, et avec un laser à diode asservi sur l'iode à 633 nm.

M. Helmcke demande combien de lasers participant à la comparaison ont été achetés plutôt que fabriqués par le laboratoire. M. Chartier estime que la proportion est d'environ 50 %.

8.2 Travaux de recherche

M. Robertsson présente un résumé de plusieurs activités de recherche : les effets dus à la géométrie du faisceau, où une détection partielle du faisceau du laser peut provoquer des décalages de fréquence ; la détection de raie en modulation de fréquence, par opposition à la détection du troisième harmonique ; et les travaux sur le laser à Nd:YAG à fréquence doublée. Cette dernière activité, qui a été effectuée en coopération au JILA, a permis d'obtenir une stabilité meilleure que 1×10^{-14} pour une durée moyenne de 60 s. M. Felder présente des travaux récents sur le laser asservi sur le méthane et sur un système à diode laser asservi sur une transition à deux photons du rubidium. Mme Picard décrit le nouveau programme informatique utilisé pour déterminer les composantes hyperfines.

M. Zarka décrit un système à diode laser à 633 nm qui utilise la transition P(33)6-3 de l'iode et dont la meilleure stabilité est de 3×10^{-12} . Un système d'asservissement automatique est en cours d'étude. Le laser a une plage d'accord de 4 nm ; sa stabilité est limitée par l'électronique. M. Helmcke demande si l'on peut mettre en évidence des bandes latérales, et explique qu'il est parfois difficile de les observer. On n'en a observée aucune.

8.3 Nanométrie

M. Vitouchkine présente ses activités dans le domaine de la nanométrie, pour lesquelles il utilise un interféromètre afin de mesurer le pas des réseaux.

Le domaine couvert et la définition de la nanométrie soulèvent une longue discussion, ainsi que son importance pour les fabricants de semiconducteurs, par

exemple. M. Quinn demande au Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle de donner au CCDM une définition plus claire de la nanométrie.

9 GROUPES DE TRAVAIL DU CCDM

9.1 Groupe de travail sur la mise en pratique

Le président propose de créer un nouveau groupe de travail sur la mise en pratique, en se fondant sur la majorité des réponses au questionnaire du Bureau international. Ce groupe de travail serait chargé d'étudier le texte de la mise en pratique et de proposer des changements, ainsi que des comparaisons clés, et de veiller à la préparation d'une base de données sur les fréquences de lasers asservis. Dix laboratoires sont volontaires pour faire partie de ce groupe de travail : BIPM, BNM-INM, BNM-LPTF, CSIRO-NML, KRISS, NIST, NPL, NRC, NRLM et PTB.

M. Gill est choisi comme président du Groupe de travail sur la mise en pratique.

9.2 Formule pour la détermination de l'indice de réfraction

M. Sacconi souligne la nécessité d'une approche plus uniforme pour calculer l'indice de réfraction. Les comparaisons réalisées récemment ont montré que les laboratoires utilisent des formules différentes. Une discussion a lieu sur les travaux récents et M. Rowley souligne qu'un réfractomètre donnerait les valeurs les plus exactes. Les participants sont favorables à une formule adaptée aux radiations recommandées. M. Matsumoto rappelle qu'il existe déjà un groupe de travail international chargé de cette question. M. Quinn suggère que le CCDM pourrait adopter une formule pour déterminer l'indice de réfraction. Les participants chargent M. Sacconi de contacter des chercheurs connus dans ce domaine afin d'obtenir un avis d'expert sur une formule adéquate ou de former un groupe de discussion à cette fin.

9.3 Groupe de travail sur les travaux futurs

M. Quinn avait créé un petit groupe de travail au début de la réunion pour rédiger un projet de recommandation sur les travaux futurs, la Recommandation

M 2 (1997). Le projet A est examiné par les participants et modifié ; le projet B est approuvé à l'unanimité après examen.

10 RECOMMANDATIONS AU COMITÉ INTERNATIONAL

10.1 Pourquoi ces recommandations ?

Le président demande à M. Quinn d'expliquer les raisons de ces recommandations. M. Quinn mentionne des travaux passés du Bureau international et se réfère au rapport du Comité international intitulé *Besoins nationaux et internationaux dans le domaine de la métrologie, les collaborations internationales et le rôle du BIPM*. Ce rapport traite des missions à venir du Bureau international. L'une d'elles est l'uniformité mondiale des mesures. Il faut aussi ajouter les travaux fondamentaux pour maintenir les unités, comme par exemple, la conservation et la dissémination de l'unité de masse. Le CCDM doit informer le Comité international des besoins à venir dans le domaine de la métrologie des longueurs et donner son avis sur les activités du Bureau international pour la décennie à venir.

10.2 Travaux futurs au Bureau international

M. Quinn évoque le remplacement éventuel du laser à He-Ne asservi sur l'iode à 633 nm. À la suite d'une discussion générale, les participants concluent que le laser à 633 nm reste utile tant que les interféromètres laser du commerce et que les étalons secondaires, de faible coût, continueront à être fondés sur cette longueur d'onde. Les systèmes rivaux sont le laser à Nd:YAG doublé en fréquence à 532 nm et le laser à diode asservi sur la transition à deux photons du rubidium à 778 nm, mais il n'existe pas encore d'étalons secondaires bon marché pour ces deux systèmes. Une autre possibilité est la synthèse de fréquences, technique qui exige de gros efforts ; il serait possible que le Bureau international collabore avec d'autres laboratoires à Paris, capables de mettre en œuvre cette technique.

M. Quinn demande au CCDM des directives pour la métrologie dimensionnelle. Les participants pensent que ce domaine est trop vaste pour que le Bureau s'y engage. Certains sont favorables à une activité en nanométrie et M. Quinn

mentionne des points communs à cette activité et aux travaux sur les nouveaux étalons de masse, dont le fini de surface est si important que le Bureau doit utiliser un outil au diamant pour fabriquer des cylindres convenables. Le Bureau fabrique aussi des ouvertures de très haute exactitude, pour la photométrie, et qui ont besoin d'être mesurées. M. Priel note que des investissements importants sont nécessaires pour effectuer des mesures de circularité et de forme de haute exactitude ; le Bureau devrait trouver un partenaire pour ces travaux. M. Pekelsky dit que la plupart des activités dans le domaine de la métrologie dimensionnelle demandent une exactitude de mesure de l'ordre du nanomètre. Il serait souhaitable que le Bureau s'engage dans ce domaine. M. Eom a le même sentiment. M. Sacconi suggère que le Bureau continue à centrer ses activités sur des étalons transportables pour la dissémination du mètre, comme il l'a fait avec succès, tout en ayant une certaine présence dans le domaine de la nanométrie.

10.3 Changement de nom du CCDM

M. Quinn pose la question d'un changement de nom du CCDM, comme M. Blevin l'avait proposé. Tout en étant conscients que c'est au Comité international de prendre une décision à ce sujet, les participants sont intéressés par la question. M. Helmcke est favorable au sigle « CCL » (Comité consultatif des longueurs) qui recoupe les deux aspects des travaux de ce comité, c'est-à-dire la mise en pratique de la définition du mètre et la métrologie dimensionnelle. Cette suggestion est approuvée par la majorité, étant donné que le sigle « CCM » (pour Comité consultatif du mètre) est déjà attribué au Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées.

11 DATE DE LA PROCHAINE SESSION

Le président remercie les participants de leur présence, les groupes de travail de leur contribution et M. Brown d'avoir accepté la charge de rapporteur. La prochaine session devrait avoir lieu dans trois ans, en l'an 2000.

N. Brown, rapporteur
septembre 1997
révisé décembre 1998

**Recommandations du
Comité consultatif pour la définition du mètre
présentées au
Comité international des poids et mesures**

1 RECOMMANDATION M 1 (1997)* :
Révision de la mise en pratique de la définition du mètre

Le Comité consultatif pour la définition du mètre,

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 CGPM a invité le Comité international des poids et mesures (CIPM)
 - à établir des instructions pour la mise en pratique de la nouvelle définition du mètre,
 - à choisir des radiations qui puissent être recommandées comme étalon de longueur d'onde pour la mesure interférométrique des longueurs et à établir des instructions pour leur emploi,
 - à poursuivre les études entreprises pour améliorer ces étalons ;
- qu'en réponse à cette invitation le CIPM a adopté en 1983 des recommandations visant la réalisation pratique du mètre (la mise en pratique) ;

rappelant qu'en 1992 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 1992, les travaux effectués dans les laboratoires nationaux, au BIPM et dans d'autres laboratoires ont permis d'identifier de nouvelles radiations dont les méthodes de réalisation conduisent à de faibles incertitudes ;

* Cette recommandation a été approuvée par le CIPM à sa 86^e session comme Recommandation 1 (CI-1997), voir page 38.

- que ces travaux ont aussi permis de réduire sensiblement l'incertitude sur la valeur de la fréquence et de la longueur d'onde dans le vide de l'une des radiations recommandée antérieurement ;
- qu'une mise à jour de la liste de radiations recommandées est souhaitable en vue de diverses applications qui comprennent non seulement la réalisation du mètre, impliquant l'interférométrie optique pour la mesure pratique des longueurs, mais aussi la spectroscopie, la physique atomique et moléculaire et la détermination de constantes physiques fondamentales ;

recommande que la liste des radiations recommandées donnée par le CIPM en 1992 (Recommandation 3 (C1-1992)) soit révisée.

2 RECOMMANDATION M 2 (1997) : Travaux futurs

Le Comité consultatif pour la définition du mètre,

considérant que

- la science et les techniques exigent en permanence des réalisations plus exactes du mètre ;
- les besoins de la métrologie dimensionnelle de haut niveau s'accroissent de façon continue ;
- les laboratoires nationaux de métrologie font l'objet d'une demande impérative de démontrer leur degré d'équivalence dans le domaine des mesures de longueur ;
- l'uniformité internationale et la stabilité à long terme des mesures de longueur impliquent la réalisation de l'unité SI de longueur ;
- les tolérances dans les procédés de fabrication de haute technologie continuent à se resserrer et que dans certains domaines elles atteignent déjà la limite des possibilités actuelles ;
- l'étendue de mesure pour laquelle de telles exigences se manifestent va des dimensions atomiques jusqu'au domaine de la géophysique ;

- plusieurs autres domaines de la métrologie font appel aux unités dérivées du SI qui elles-mêmes impliquent le mètre ;
- les demandes les plus exigeantes font souvent appel à la réalisation directe du mètre au moyen d'étalons de longueur d'onde et de fréquence optique, réalisation qui doit être la plus simple et la plus directe possible ;
- pour répondre aux besoins à venir et pour assurer que le système métrologique mondial sera en mesure de répondre à ces besoins, il est essentiel de poursuivre des recherches de base ;

recommande que les laboratoires nationaux

- maintiennent un large éventail de recherches de base dans le domaine des longueurs et en particulier continuent à développer les techniques propres à répondre aux exigences croissantes dans le domaine de la métrologie dimensionnelle et
- maintiennent leurs efforts pour perfectionner et évaluer de nouveaux étalons de longueur, de longueur d'onde et de fréquence optique et de nouvelles techniques de comparaison de ces différents étalons dans un large domaine de longueur d'onde et de fréquence.

**Recommandation du
Comité consultatif pour la définition du mètre
adoptée par le
Comité international des poids et mesures**

RECOMMANDATION 1 (CI-1997) :
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 CGPM a invité le Comité international des poids et mesures (CIPM)
 - à établir des instructions pour la mise en pratique de la nouvelle définition du mètre,
 - 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 le CIPM avait recommandé une liste de radiations à cet effet ;

rappelant aussi qu'en 1992 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 1992, 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 oeuvre qui conduisent à de faibles incertitudes ;
- que ces travaux ont aussi permis de réduire sensiblement l'incertitude sur la valeur de la fréquence et de la longueur d'onde dans le vide de l'une des radiations recommandées antérieurement ;
- qu'une mise à jour de la liste des radiations recommandées est souhaitable en vue de diverses applications qui comprennent non seulement la réalisation directe du mètre, impliquant l'interférométrie optique pour la mesure pratique des longueurs, mais aussi la spectroscopie, la physique atomique et moléculaire et la détermination de constantes physiques fondamentales ;

recommande

- que la liste des radiations recommandées donnée par le CIPM en 1992 (Recommandation 3 (CI-1992)) soit remplacée par la liste de radiations donnée ci-dessous ;
- que la note suivante au sujet de la relativité générale soit ajoutée aux règles pour la réalisation du mètre :

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. 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 CCDS 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).

Note. Il est habituel d'utiliser la notation c_0 pour la vitesse de la lumière dans le vide (ISO 31). La notation c avait été utilisée dans le texte d'origine de la Recommandation de 1983.

**Liste des radiations recommandées pour la réalisation du mètre
approuvées par le CIPM en 1997 :
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**, 141-144 et dans *Metrologia*, 1984, **19**, 165-166, 1993-1994, **30**, 523-541.

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 : Données utilisées pour établir la liste des radiations recommandées, 1997, et Bibliographie commentée.

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. 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 CCDM⁽¹⁾ ou auprès du BIPM.

1 Radiations recommandées de lasers asservis

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

Les valeurs $f = 1\,233\,030\,706\,593,7\text{ kHz}$
 $\lambda = 243\,134\,624,6260\text{ fm}$

avec une incertitude-type relative de $8,5 \times 10^{-13}$, s'appliquent à une radiation asservie sur une 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 du second ordre, ce qui ramène à des atomes réellement stationnaires.

On peut aussi utiliser d'autres transitions absorbantes dans l'hydrogène, ces transitions sont données dans l'annexe M 3 du Rapport du CCDM (1997).

1.2 Molécule absorbante $^{127}\text{I}_2$, transition 43-0, P(13), composante a_3 (ou s)

Les valeurs $f = 582\,490\,603,37\text{ MHz}$
 $\lambda = 514\,673\,466,4\text{ fm}$

avec une incertitude-type relative de $2,5 \times 10^{-10}$, s'appliquent à la radiation émise par 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 $(-5 \pm 2)^\circ\text{C}^{(2)}$.

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

⁽²⁾ Pour ce qui concerne la spécification des conditions de mise en oeuvre, telles que la température, la largeur de modulation et la puissance du laser, le symbole \pm fait référence à une tolérance et non pas à une incertitude.

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

Les valeurs $f = 563\,260\,223,48\text{ MHz}$

$$\lambda = 532\,245\,036,14\text{ fm}$$

avec une incertitude-type relative de 7×10^{-11} , s'appliquent à la radiation émise par un laser Nd:YAG à fréquence doublée asservi à l'aide d'une cuve à iode, située à l'extérieur du laser, ayant un point froid à une température située entre -10 °C et -20 °C .

On peut aussi utiliser d'autres transitions absorbantes de $^{127}\text{I}_2$ proches de cette transition, en faisant référence aux différences de fréquence ci-dessous, dont l'incertitude-type est $u_c = 2\text{ kHz}$.

Longueurs d'onde de transitions de $^{127}\text{I}_2$

Transition	Différence de fréquence
x	$[f(x) - f(32-0, \text{R}(56), a_{10})]/\text{kHz}$
32-0, R(57), a_1	-50 946 880,4
32-0, P(54), a_1	-47 588 892,5
35-0, P(119), a_1	-36 840 161,5
33-0, R(86), a_1	-32 190 404,0
34-0, R(106), a_1	-30 434 761,5
36-0, R(134), a_1	-17 173 680,4
33-0, P(83), a_{21}	-15 682 074,1
32-0, R(56), a_{10}	0
32-0, P(53), a_1	+2 599 708,0

Ici, $f(x)$ représente la fréquence de la transition dénommée x et $f(32-0, \text{R}(56), a_{10})$ la fréquence de la transition de référence.

1.4 Molécule absorbante $^{127}\text{I}_2$, transition 26-0, R(12), composante a_9

Les valeurs $f = 551\,579\,482,96\text{ MHz}$

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

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

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

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

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

avec une incertitude-type relative de 3×10^{-10} , s'appliquent à la radiation émise par un laser à He-Ne 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 $(-5 \pm 2)^\circ\text{C}$.

1.6 Molécule absorbante $^{127}\text{I}_2$, transition 11-5, R(127), composante a_{13} (ou i)

Les valeurs $f = 473\,612\,214\,705$ kHz

$$\lambda = 632\,991\,398,22 \text{ fm}$$

avec une incertitude-type relative de $2,5 \times 10^{-11}$, s'appliquent à la radiation émise par un laser à He-Ne asservi par la technique du troisième harmonique, à l'aide d'une cuve à iode, située à l'intérieur du laser, lorsque les conditions suivantes sont respectées :

- température des parois de la cuve : $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$;
- point froid à la température de : $(15 \pm 0,2)^\circ\text{C}$;
- modulation de fréquence, crête à creux : $(6 \pm 0,3)$ 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 ± 5) mW pour une valeur absolue du coefficient de décalage en fonction de la puissance $\leq 1,4$ kHz/mW.

Ces conditions ne suffisent pas par elles-mêmes à garantir l'obtention de l'incertitude-type indiquée. Il faut en outre que les parties optique et électronique du système 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 M 2 du rapport du CCDM (1997).

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

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

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

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

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

Les valeurs $f = 455\,986\,240\,494,15$ kHz

$$\lambda = 657\,459\,439,2917 \text{ fm}$$

avec une incertitude-type relative de 6×10^{-13} , s'appliquent à la radiation émise par un laser asservi à l'aide d'atomes de Ca. Ces 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 du second ordre.

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

Les valeurs $f = 444\,779\,044,04$ MHz

$$\lambda = 674\,025\,590,95 \text{ fm}$$

avec une incertitude-type relative de $1,3 \times 10^{-10}$, s'appliquent à la radiation émise par 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.

1.10 Atome absorbant ^{85}Rb , transition $5\text{S}_{1/2}(F=3) - 5\text{D}_{5/2}(F=5)$ à deux photons

Les valeurs $f = 385\,285\,142\,378$ kHz

$$\lambda = 778\,105\,421,22 \text{ fm}$$

avec une incertitude-type relative de $1,3 \times 10^{-11}$, s'appliquent à la radiation émise par 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°C ; elles sont corrigées pour une puissance laser nulle et pour tenir compte du déplacement Doppler du second ordre.

D'autres transitions absorbantes du rubidium peuvent aussi être utilisées, elles sont données à l'annexe M 3 du rapport du CCDM (1997).

1.11 Molécule absorbante CH₄, transition ν_3 , P(7), composante F₂⁽²⁾

1.11.1 Les valeurs $f = 88\,376\,181\,600,18$ kHz

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

avec une incertitude-type relative de 3×10^{-12} , s'appliquent à la radiation émise par un laser à He-Ne asservi à l'aide de la composante centrale [transition (7-6)] du triplet de structure hyperfine résolu. Ces 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 du second ordre.

1.11.2 Les valeurs $f = 88\,376\,181\,600,5$ 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 émise par un laser à He-Ne asservi sur le centre de la structure hyperfine non résolue à l'aide d'une cuve à méthane, située à l'intérieur ou à l'extérieur du laser, à la température ambiante, lorsque les conditions suivantes sont respectées :

- pression du méthane ≤ 3 Pa ;
- puissance surfacique moyenne transportée par le faisceau dans un seul sens (c'est-à-dire puissance surfacique de sortie divisée par le facteur de transmission du miroir de sortie), à l'intérieur de la cavité $\leq 10^4 \text{ W m}^{-2}$;
- rayon de courbure des surfaces d'onde ≥ 1 m ;
- différence relative de puissance entre les deux ondes qui se propagent en sens inverse l'une de l'autre ≤ 5 % ;
- récepteur d'asservissement placé à la sortie du dispositif du côté du tube à He-Ne.

1.12 Molécule absorbante OsO₄, transition en coïncidence avec la raie laser ¹²C¹⁶O₂, R(12)

Les valeurs $f = 29\,096\,274\,952,34$ kHz

$$\lambda = 10\,303\,465\,254,27 \text{ fm}$$

avec une incertitude-type relative de 6×10^{-12} , s'appliquent à la radiation émise par un laser à CO₂ asservi sur une cuve à OsO₄, remplie à une pression inférieure à 0,2 Pa, située à l'extérieur du laser.

On peut utiliser d'autres transitions ; elles sont données à l'annexe M 3 du rapport du CCDDM (1997).

2 Valeurs recommandées de radiations de lampes spectrales et autres sources

2.1 Radiation correspondant à la transition entre les niveaux 2p₁₀ et 5d₅ de l'atome de ⁸⁶Kr

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

avec une incertitude relative élargie⁽³⁾, $U = ku_c$ ($k = 3$), de 4×10^{-9} [égale à trois fois l'incertitude-type relative de $1,3 \times 10^{-9}$], s'applique à la radiation émise par une lampe à décharge utilisée dans les conditions recommandées par le CIPM en 1960 (*BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1960, 28, 71-72 et *BIPM Comptes rendus 11^e Conf. gén. poids et mesures*, 1960, 85) ; ces conditions sont les suivantes :

La radiation du krypton 86 est réalisée au moyen d'une lampe à décharge à cathode chaude contenant du krypton 86 d'une pureté non inférieure à 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 les caractéristiques suivantes : diamètre intérieur 2 mm à 4 mm, épaisseur de la paroi 1 mm environ.

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

1. le capillaire est observé en bout de façon que les rayons lumineux utilisés cheminent du côté cathodique vers le côté anodique ;

⁽³⁾ L'incertitude figurant dans le document de 1960 était de 1×10^{-8} , elle a ensuite été modifiée et portée à 4×10^{-9} (*BIPM Com. cons. déf. mètre*, 1973, 5, M 12).

2. 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 ;
3. la densité du courant dans le capillaire est $(0,3 \pm 0,1) \text{ A/cm}^2$.

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

En 1963 le CIPM (*BIPM Com. cons. déf. mètre*, 1962, **3**, 18-19 et *BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1963, **52**, 26-27) a recommandé des valeurs de longueurs d'onde dans le vide, λ , et d'incertitudes, pour certaines transitions des atomes de ^{86}Kr , ^{198}Hg et ^{114}Cd , ainsi que les conditions d'utilisation suivantes :

Longueurs d'onde dans le vide, λ , de transitions du ^{86}Kr

Transition	λ/pm
$2p_9 - 5d'_4$	645 807,20
$2p_8 - 5d_4$	642 280,06
$1s_3 - 3p_{10}$	565 112,86
$1s_4 - 3p_8$	450 361,62

Pour le ^{86}Kr , les valeurs ci-dessus s'appliquent, avec une incertitude de 2×10^{-8} en valeur relative, aux radiations émises par une lampe opérant dans des conditions similaires à celles mentionnées précédemment (2.1).

Longueurs d'onde dans le vide, λ , de transitions du ^{198}Hg

Transition	λ/pm
$6^1P_1 - 6^1D_2$	579 226,83
$6^1P_1 - 6^3D_2$	577 119,83
$6^3P_2 - 7^3S_1$	546 227,05
$6^3P_1 - 7^3S_1$	435 956,24

Pour le ^{198}Hg , les valeurs ci-dessus s'appliquent, avec une incertitude de 5×10^{-8} en valeur relative, aux radiations émises par une lampe à décharge, lorsque les conditions suivantes sont observées :

- a) les radiations sont produites au moyen d'une lampe à décharge sans électrodes contenant du mercure 198 d'une pureté non inférieure à 98 % et de l'argon à une pression comprise entre 0,5 mm Hg et 1,0 mm Hg (66 Pa à 133 Pa) ;
- b) le diamètre intérieur du capillaire de la lampe est d'environ 5 mm, et les radiations sont observées en travers ;
- c) la lampe est excitée par un champ à haute fréquence de puissance modérée ; elle est maintenue à une température inférieure à 10 °C ;
- d) le volume de la lampe est de préférence supérieur à 20 cm³.

Longueurs d'onde dans le vide, λ , de transitions du ¹¹⁴Cd

Transition	λ/pm
$5^1\text{P}_1 - 5^1\text{D}_2$	644 024,80
$5^3\text{P}_2 - 6^3\text{S}_1$	508 723,79
$5^3\text{P}_1 - 6^3\text{S}_1$	480 125,21
$5^3\text{P}_0 - 6^3\text{S}_1$	467 945,81

Pour le ¹¹⁴Cd, les valeurs ci-dessus s'appliquent, avec une incertitude de 7×10^{-8} en valeur relative, aux radiations émises par une lampe à décharge, lorsque les conditions suivantes sont observées :

- a) les radiations sont produites au moyen d'une lampe à décharge sans électrodes, contenant du cadmium 114 d'une pureté non inférieure à 95 % et de l'argon à une pression 1 mm Hg (133 Pa) environ à la température ambiante ;
- b) le diamètre intérieur du capillaire de la lampe est environ 5 mm, et les radiations sont observées en travers ;
- c) 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. [*sic*]

Note. Les incertitudes citées dans la Section 2.2 correspondent aux incertitudes élargies relatives $U = ku_c$ ($k = 3$), égales à trois fois l'incertitude-type relative composée.

2.3 Molécule absorbante $^{127}\text{I}_2$, transition 17-1, P(62) composante a_1 , recommandée par le CIPM en 1992 (*BIPM Com. cons. déf. mètre*, 1992, **8**, M 18 et M 137, et Mise en pratique of the definition of the metre (1992), *Metrologia*, 1993/94, **30**, 523-541).

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 émise par un laser à colorant (ou par un laser à He-Ne associé à un doubleur de 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 $(6 \pm 2)^\circ\text{C}$.

ANNEXE M 1.

Documents de travail présentés à la 9^e session du CCDM

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

Document
CCDM/

- 97-1 CCDM. — Questionnaire: possible revision of the *mise en pratique* of the definition of the metre, 4 p.
- 97-2 CSIR (Afrique du Sud). — Réponse au questionnaire, 4 p.
- 97-3a NIST/JILA (États-Unis). — Réponse au questionnaire, 4 p.
- 3b Frequency gaps of I₂ lines at 532 nm, 2 p.
- 97-4 CENAM (Mexique). — Réponse au questionnaire, 4 p.
- 97-5 CSIRO (Australie). — Réponse au questionnaire, 4 p.
- 97-6 KRISS (Rép. de Corée). — Réponse au questionnaire, 3 p.
- 97-7 NMi (Pays-Bas). — Réponse au questionnaire, 3 p.
- 97-8 NIM (Chine). — Réponse au questionnaire, 3 p.
- 97-9a NPL (Royaume-Uni). — Réponse au questionnaire, 4 p.
- 9b Interferometric frequency measurements of an iodine stabilised Nd:YAG laser, G.M. Macfarlane, G.P. Barwood, W.R.C. Rowley and P. Gill, 2 p.
- 9c Proposed guidelines CCL (former CCDM) frequency and wavelength value rounding and uncertainties, W.R.C. Rowley, 1 p.
- 97-10a CMI (Rép. tchèque). — Réponse au questionnaire, 7 p.
- 10b Additional response to the questionnaire, 3 p.
- 97-11a PTB (Allemagne). — Réponse au questionnaire, 3 p.
- 11b Status of the optical calcium frequency standard at PTB, 6 p.
- 97-12 SMU (Slovaquie). — Réponse au questionnaire, 4 p.
- 97-13 OFMET (Suisse). — Réponse au questionnaire, 2 p.
- 97-14 NRC (Canada). — Réponse au questionnaire, 14 p.

Document
CCDM/

- 97-15 NRLM (Japon). — Réponse au questionnaire, 3 p.
- 97-16 IMGCI (Italie). — Réponse au questionnaire, 3 p.
- 97-17 VNIIM (Féd. de Russie). — Réponse au questionnaire, 4 p.
- 97-18 BIPM. — Réponse au questionnaire, 5 p.
- 97-19 BIPM. — Summary of responses to the questionnaire, 1 p.
- 97-20 Working group on dimensional metrology. — Chairman's report on 1st meeting of CCDM/WGDM, J. Pekelsky, 4 p.
- 97-21 Working group on dimensional metrology. — Chairman's report: activities to July 1997, J. Pekelsky, 3 p.
- 97-22 Note concerning general relativity in Appendix 2 of the SI brochure (Practical realization of the definitions of some important units, Section 1: length), 1 p.
- 97-23 BNM (France). — Réponse au questionnaire, 4 p.
- 97-24 OFMET (Suisse). — CCDM comparison of gauge block measurements, B.G. Vaucher and R. Thalmann, 9 p.
- 97-25 Working group on the mise en pratique of the definition of the metre. — Proposal to the 1997 CCDM, P. Gill, 5 p.

ANNEXE M 2.**Données utilisées pour établir la liste des radiations recommandées, 1997, et bibliographie commentée**

Cette annexe figure uniquement en anglais, *voir* page 105.

ANNEXE M 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 133.

LISTE DES SIGLES UTILISÉS DANS LE PRÉSENT VOLUME

1 Sigles des laboratoires, commissions et conférences

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
CSMU*	Československý Metrologický Ústav, Bratislava et Prague (ex-Tchécoslovaquie), <i>voir</i> SMU
CENAM	Centro Nacional de Metrologia, 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)
CSELT	Centro Studi e Laboratori Telecomunicazioni, Turin (Italie)
CSIR-NML	Council for Scientific and Industrial Research, National Metrology Laboratory, Pretoria (Afrique du Sud)
CSIRO-NML	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, National Measurement Laboratory, Lindfield (Australie)
EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
IMGC	Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Turin (Italie)
INM*	Institut national de métrologie, Paris (France), <i>voir</i> BNM-INM
ISO	Organisation internationale de normalisation
JILA	Joint Institute for Laboratory Astrophysics, Boulder CO (États-Unis)

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

KRISS	Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon (Rép. de Corée)
LENS	European Laboratory for Nonlinear Spectroscopy, Florence (Italie)
LPTF*	Laboratoire primaire du temps et des fréquences, Paris (France), <i>voir</i> BNM-LPTF
MPQ	Max Planck Institut für Quantenoptik, Garching (Allemagne)
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)
NML	<i>voir</i> CSIR
NML	<i>voir</i> CSIRO
NPL	National Physical Laboratory, Teddington (Royaume-Uni)
NRC	National Research Council of Canada, Ottawa (Canada)
NRLM	National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba (Japon)
OFMET	Office fédéral de métrologie/Eidgenössisches Amt für Messwesen, Wabern (Suisse)
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig et Berlin (Allemagne)
SMU	Slovenský Metrologický Ústav/Slovak Institute of Metrology, Bratislava (Slovaquie)
VNIIM	Institut de métrologie D.I. Mendéléev, Saint-Pétersbourg (Féd. de Russie)
WGDM	Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle/ Working group on dimensional metrology

2 Sigles des termes scientifiques

SI	Système international d'unités
----	--------------------------------