

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES



COMITÉ CONSULTATIF
POUR
LA DÉFINITION DU MÈTRE

Rapport de la 8^e session
Report of the 8th Meeting
1992

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DU MÈTRE

SESSION DE 1992

MEETING OF 1992

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES



COMITÉ CONSULTATIF
POUR
LA DÉFINITION DU MÈTRE

Rapport de la 8^e session
Report of the 8th Meeting
1992

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

ISSN 0253-2182
ISBN 92-822-2133-4

LISTE DES SIGLES UTILISÉS DANS LE PRÉSENT VOLUME
LIST OF ACRONYMS USED IN THE PRESENT VOLUME

1. Sigles des laboratoires, commissions et conférences
Acronyms for laboratories, committees and conferences

*ASMW	Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung, Berlin (Allemagne)
BFMMP /SZMDM	Bureau fédéral des mesures et métaux précieux/Savezni Zavod za Mere i Dragocene Metale, Belgrade (ex-Yougoslavie)
BCR	Bureau communautaire de référence de la Communauté économique européenne/Community Bureau of Reference of the Commission of the European Communities
BIPM	Bureau international des poids et mesures
BNM	Bureau national de métrologie, Paris (France)
CCDM	Comité consultatif pour la définition du mètre
CCDS	Comité consultatif pour la définition de la seconde
CCE	Comité consultatif d'électricité
CEM	Centro Español de Metrologia, Madrid (Espagne)
CGPM	Conférence générale des poids et mesures
CIPM	Comité international des poids et mesures
CIRP	International Institution for Production Engineering Research
CNAM	Conservatoire national des arts et métiers, Paris (France)
CPEM	Conference on Precision Electromagnetic Measurements
*CSAV	Československa Akademie Ved, Brno et Prague (Tchéco-Slovaquie), voir ISI
CSIR	Council for Scientific and Industrial Research, Division of Production Technology, Pretoria (Afrique du Sud)
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Division of Applied Physics, Lindfield (Australie)
CSMU	Československý Metrologický Ústav, Bratislava et Prague (Tchéco-Slovaquie)
DFM	Danish Institute for Fundamental Metrology, Lyngby (Danemark)

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

* Organizations marked with an asterisk either no longer exist or operate under a different acronym.

DKD	Deutscher Kalibrierdienst, Braunschweig (Allemagne), <i>voir</i> PTB
*DSIR	Department of Scientific and Industrial Research, Lower Hutt (Nouvelle-Zélande), <i>voir</i> MSL
EAM	<i>voir</i> OFMET
ETCA	Établissement technique central de l'armement, Arcueil (France)
EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
HUB	Helsinki University of Technology, Accelerator Laboratory, Helsinki (Finlande)
IAU	<i>voir</i> UAI
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFA/IFTAR	Institute of Atomic Physics, Bucarest (Roumanie)
IGM	Inspection générale de la métrologie, Bruxelles (Belgique)
IMGC	Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Turin (Italie)
INM	Institut national de métrologie, Paris (France)
IPL	Institut de physique des lasers de l'Académie des sciences de Russie/Institute of Laser Physics, Academy of Sciences of Russia, Novosibirsk (Féd. de Russie)
IPQ	Instituto Português da Qualidade, Lisbonne (Portugal)
ISI	(ex-CSAV) Institute of Scientific Instruments of the Academy of Sciences of the Czech Republic, Brno (Rép. Tchèque)
ISO	Organisation internationale de normalisation/ International Organization for Standardization
JILA	Joint Institute for Laboratory Astrophysics, Boulder (É.-U. d'Amérique)
KRISS	(ex KSRI) Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon (Rép. de Corée)
*KSRI	Korea Standards Research Institute, Taejon (Rép. de Corée), <i>voir</i> KRISS
LHA	Laboratoire de l'horloge atomique, Orsay (France)
LMM	Laboratorio de Metrologia y Metrotecnica, Universidad Politecnica de Madrid, Madrid (Espagne)
LNE	Laboratoire national d'essais, Orsay et Paris (France)
LPI	Institut de physique P.N. Lebedev/P.N. Lebedev Physics Institute, Moscou (Féd. de Russie)
LPTF	Laboratoire primaire du temps et des fréquences, Paris (France)
MRI	Metrology Research Institute, Helsinki University of Technology, Helsinki (Finlande)
MSL	(ex DSIR) Measurement Standards Laboratory of New Zealand, Lower Hutt (Nouvelle-Zélande)
*NBS	National Bureau of Standards, Gaithersburg (É.-U. d'Amérique), <i>voir</i> NIST

NIM	Institut national de métrologie/National Institute of Metrology, Beijing (Rép. pop. de Chine)
NIST	(ex NBS) National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg (É.-U. d'Amérique)
NML	National Measurement Laboratory, Lindfield (Australie), <i>voir</i> CSIRO
NPL	National Physical Laboratory, Teddington (Royaume-Uni)
NPLI	National Physical Laboratory of India, New Delhi (Inde)
NRC	Conseil national de recherches du Canada/National Research Council of Canada, Ottawa (Canada)
NRLM	National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba (Japon)
OFMET/EAM	Office fédéral de métrologie/Eidgenössisches Amt für Messwesen, Wabern (Suisse)
OMH	Országos Mérésügyi Hivatal, Budapest (Hongrie)
PEL	Physics and Engineering Laboratory, Lower Hutt (Nouvelle-Zélande)
PKNM	Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Varsovie (Pologne)
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig (Allemagne)
SP	Statens Provningsanstalt, Borås (Suède)
TTK	Technical Research Centre of Finland, Helsinki (Finlande)
UAI/IAU	Union astronomique internationale/International Astronomical Union
UPT	Ústav Prístrojové Techniky Českosl. Akademie Ved, Institute of Scientific Instruments, Brno (Tchéco-Slovaquie)
VNIIFTRI	Institut des mesures physico-techniques et radiotechniques/All-Russian Research Institute for Physical, Technical and Radio-Technical Measurements, Moscou (Féd. de Russie)
VNIIM	Institut de métrologie D.I. Mendéléev/D.I. Mendeleyev Institute for Metrology, Saint-Pétersbourg (Féd. de Russie)
WECC	Western European Calibration Cooperation

2. Sigles des termes scientifiques Acronyms for scientific terms

CMM	Coordonnées tri-dimensionnelles/3 D Coordinate Metrology
ULE	Ultra Low Expansion

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 chargé :

- d'établir les étalons fondamentaux et les échelles 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 déterminations relatives aux constantes physiques 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).

La Conférence générale est formée des délégués de tous les États membres de la Convention du Mètre et se réunit actuellement tous les quatre ans. Elle reçoit à chacune de ses sessions le rapport du Comité international sur les travaux accomplis, et a pour mission :

- 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 les décisions importantes concernant l'organisation et le développement du Bureau international.

Le Comité international est composé de 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.

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 (1937), des rayonnements ionisants (1960), aux échelles de temps (1988) et à la quantité de matière (1993). 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.

* Au 31 décembre 1993, quarante-sept États sont membres de cette Convention: Afrique du Sud, Allemagne, Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép. d'), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, Canada, Chili, Chine (Rép. pop. de), Corée (Rép. de), Corée (Rép. pop. dém. de), Danemark, Dominicaine (Rép.), Égypte, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran, Irlande, Israël, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Nouvelle-Zélande, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Russie (Féd. de), Slovaque (Rép.), Suède, Suisse, Tchéque (Rép.), Thaïlande, Turquie, Uruguay, Venezuela.

Une quarantaine de physiciens ou de 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 dans les domaines mentionnés ci-dessus. 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, le Comité international a institué depuis 1927, 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 des recommandations concernant les unités, en vue des décisions que le Comité international est amené à prendre directement ou à soumettre à la sanction de la Conférence générale pour assurer l'unification mondiale des unités de mesure.

Les comités consultatifs ont un règlement commun (*BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1963, **31**, 97). Chaque comité consultatif, dont la présidence est généralement confiée à un membre du Comité international, est composé de délégués de chacun des grands laboratoires de métrologie et des instituts spécialisés dont la liste est établie par le Comité international, de membres individuels désignés également par le Comité international et d'un représentant du Bureau international. Ces comités tiennent leurs sessions à des intervalles irréguliers ; ils sont actuellement au nombre de neuf :

1. Le 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 Comité précédent (CCE) s'est occupé des questions de photométrie).
3. Le Comité consultatif de thermométrie (CCT), créé en 1937.
4. Le Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM), créé en 1952.
5. Le Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS), créé en 1956.
6. Le Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants (CEMRI), 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 CIPM 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, des comités consultatifs et du Bureau international sont publiés par les soins de ce dernier 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* ;
- *Sessions des comités consultatifs* ;
- *Recueil de travaux du Bureau international des poids et mesures* (ce recueil hors commerce rassemble les articles publiés dans des revues et ouvrages scientifiques et techniques, ainsi que certains travaux publiés sous forme de rapports multicopiés).

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 en 1966 par décision du Comité international.

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

Comité international des poids et mesures

Secrétaire

J. KOVALEVSKY

Président

D. KIND

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ CONSULTATIF

POUR LA DÉFINITION DU MÈTRE

Président

P. B. CLAPHAM, membre du Comité international des poids et mesures,
National Physical Laboratory, Teddington.

Membres

BUREAU NATIONAL DE MÉTROLOGIE, Paris : Institut national de métrologie
[INM] du Conservatoire national des arts et métiers [CNAM].

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.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [PTB], Braunschweig.

UNION ASTRONOMIQUE INTERNATIONALE [UAI].

B. EDLÉN, Lunds Universiteit, Lund.

K. SHIMODA, Tokyo.

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

ORDRE DU JOUR
de la 8^e session

1. Ouverture de la session. Nomination d'un rapporteur.
 2. Approbation de l'ordre du jour.
 3. Examen des réponses au questionnaire du BIPM.
 4. Présentation des résultats nouveaux concernant les sujets du questionnaire.
 5. Modifications éventuelles à apporter à la « mise en pratique » de la définition du mètre de 1983, et propositions de nouvelles radiations recommandées.
 6. Résultats de comparaisons internationales de lasers asservis auxquelles les laboratoires nationaux et le BIPM ont participé depuis 1983.
 7. Résultats d'une comparaison internationale d'étalons d'angle.
 8. Comparaisons internationales futures concernant :
 - a) les lasers asservis ;
 - b) les cuves à absorption d'iode ;
 - c) les règles étalons à traits, les étalons à bouts et les étalons d'angle ;
 - d) divers.
 9. Création éventuelle de groupes de travail du CCDM : missions et composition.
 10. Travaux du BIPM :
 - comparaisons internationales de lasers asservis ;
 - recherches et mise en œuvre de nouvelles techniques ;
 - collaboration avec les laboratoires nationaux ;
 - le travail futur du BIPM dans le domaine des étalons à traits et des étalons à bouts.
 11. Recommandations au CIPM.
 12. Questions diverses.
 13. Prochaine session du CCDM.
-

RAPPORT
DU
COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DU MÈTRE
(8^e session — 1992)
AU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
par W. R. C. ROWLEY, rapporteur

Le Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM) a tenu sa huitième session au Pavillon de Breteuil, à Sèvres, les mercredi 9, jeudi 10 et vendredi 11 septembre 1992.

Étaient présents :

P. B. CLAPHAM, membre du CIPM, président du CCDM.

Les délégués des laboratoires membres :

Bureau national de métrologie/Institut national de métrologie [INM], Paris (P. JUNCAR).

Conseil national de recherches du Canada [NRC], Ottawa (J. R. PEKELSKY, J. VANIER).

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield (N. BROWN).

Institut de métrologie D. I. Mendéléev [VNIIM], Saint-Petersbourg (L. F. VITUSHKIN).

Institut national de métrologie [NIM], Beijing (ZHAO KEGONG, XU YI).

Istituto di Metrologia G. Colonnetti [IMGC], Turin (A. SACCONI, F. BERTINETTO).

Korea Research Institute of Standards and Science [KRISS], Taejon (M. S. CHUNG).

National Institute of Standards and Technology [NIST], Gaithersburg (J. A. STONE)/Joint Institute for Laboratory Astrophysics [JILA], Boulder (J. L. HALL).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (W. R. C. ROWLEY).

National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Tsukuba
(T. O'ISHI).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig
(J. HELMCKE, F. RIEHLE).

Le directeur du Bureau international des poids et mesures [BIPM]
(T. J. QUINN).

Invités :

Československý Metrologický Ústav [CSMU], Bratislava (I. BREZINA).

CSIR - Division of Production Technology [DPT], Pretoria (O.
CRAMER).

Institut des mesures physico-techniques et radiotechniques
[VNIIFTRI], Moscou (V. TATARENKOV, Yu. S. DOMNIN).

Laboratoire national d'essais [LNE], Paris (M. PRIEL).

Office fédéral de métrologie [OFMET], Wabern (B. VAUCHER).

Assistaient aussi à la session : P. GIACOMO (directeur honoraire du
BIPM); J.-M. CHARTIER, R. FELDER, S. PICARD et L. ROBERTSSON (BIPM).

Absents :

Union astronomique internationale, MM. B. EDLÉN et K. SHIMODA.

1. Ouverture de la session. Nomination d'un rapporteur

Le président ouvre la session en souhaitant la bienvenue aux participants, en particulier à ceux dont les laboratoires ne sont pas membres du CCDM et qui assistent à titre d'invités. Il fait remarquer que la précédente session remonte à dix ans et que par conséquent la plupart des délégués, comme lui-même, participent pour la première fois à une réunion de ce comité. Il en appréciera davantage l'expérience de ceux qui ont assisté aux précédentes sessions.

M. Rowley est nommé rapporteur et l'ordre du jour est approuvé.

2. Progrès effectués depuis 1982 sur les radiations de lasers asservis recommandées pour la réalisation pratique du mètre

Lors de sa précédente session en 1982 le CCDM a recommandé de changer la définition du mètre fondée sur la longueur d'onde d'une radiation du krypton 86 pour la fonder sur la vitesse de la lumière. Cette recommandation a été ultérieurement approuvée par le CIPM et la

nouvelle définition a été adoptée par la 17^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM) en 1983.

En 1982 le CCDM a recommandé trois méthodes principales pour réaliser cette unité selon la nouvelle définition. La méthode la plus couramment suivie consiste à utiliser l'une des radiations recommandées. Lorsqu'elles sont obtenues dans les conditions spécifiées, et selon ce qui est considéré comme une bonne pratique, la fréquence et la longueur d'onde de ces radiations ont des valeurs connues qui sont reproductibles dans la limite des incertitudes indiquées.

L'une des principales tâches de cette 8^e session du CCDM est de revoir et de mettre à jour la liste des radiations recommandées. Depuis la précédente session des progrès considérables ont été enregistrés. Les techniques employées pour asservir la fréquence des radiations de lasers ont gagné en précision et il est possible d'établir la valeur de celles-ci avec une incertitude moindre. De plus, il est proposé d'ajouter à la liste de nouvelles radiations.

Les détails de ces améliorations ont été communiqués par les laboratoires membres, avant la session, dans les réponses à un questionnaire préalable diffusé par le BIPM (document CCDM/92-1). Ces réponses sont étayées par des renseignements complémentaires donnés dans plus de 130 articles qui ont été publiés et dont les références sont fournies. En vue de faciliter l'analyse de ces documents, un résumé (document CCDM/92-3) a été préparé par le BIPM et diffusé avant la session. Au nom des participants, le président remercie le Bureau pour ce précieux travail préparatoire.

Laser asservi sur le méthane (88 THz, 3,39 μm)

Parmi les fréquences des radiations qui ont été recommandées en 1982 pour réaliser le mètre, celle de la radiation émise par le laser à hélium-néon asservi sur le méthane était la plus exactement connue. Dans leurs documents, plusieurs laboratoires rendent compte de nouvelles mesures de cette fréquence avec une incertitude nettement moindre, et proposent de réviser la valeur de cette fréquence ainsi que son incertitude. Le CCDM est unanime pour approuver cette proposition.

À titre indicatif, M. Felder (BIPM) fait une brève présentation, résumant toutes les données dont le BIPM a connaissance. Ces données tiennent compte des résultats provenant de huit laboratoires. Cinq d'entre eux ont mis en oeuvre des chaînes de synthèse de fréquences pour mesurer la fréquence de seize lasers provenant de sept laboratoires; trois de ces lasers utilisaient la raie d'absorption du méthane en résolvant sa structure hyperfine, les treize autres utilisaient une structure non résolue. Un laser en particulier a fait l'objet de mesures dans plusieurs chaînes de fréquences. La dispersion des résultats obtenus pour ce laser n'est que de ± 300 Hz, alors que la dispersion de l'ensemble des résultats est de ± 3 kHz. La source principale de dispersion est la variabilité de type du laser portable (avec

une structure non résolue) qui dépend de la conception et des conditions de fonctionnement de celui-ci comme par exemple la puissance saturante, la courbure des miroirs et la position du détecteur.

En examinant ces résultats il apparaît qu'il conviendrait sans doute de considérer séparément le cas de la structure hyperfine résolue et le cas de la structure non résolue. Dans le cas d'une structure résolue le problème principal est de savoir comment traiter le décalage Doppler du second ordre, qui affecte certaines mesures mais pas toutes. Pour la structure non résolue, cependant, le problème principal est de spécifier les conditions convenables de fonctionnement dont on n'appréhende pas encore complètement la justification scientifique. Dans ce cas là, la valeur de la fréquence doit être donnée avec une incertitude beaucoup plus grande.

Le président suggère de confier à un petit groupe de travail la tâche de déterminer, à partir de ces données et pendant les pauses de la session, le détail des valeurs numériques, des incertitudes et de la spécification des conditions de fonctionnement. En conséquence un groupe *ad hoc*, comprenant les délégués du VNIIM, du JILA, de la PTB, du NPL, de l'INM, du NIM, de l'IMGC et du NRC, ainsi que MM. Chartier et Felder du BIPM, est créé sous la présidence de M. Helmcke.

Lors des réunions ultérieures de ce groupe de travail il est noté que quatre des six mesures indépendantes de fréquence à structure résolue ont été effectuées soit sur des molécules de méthane froides soit avec des puissances optiques si faibles que le processus de saturation n'a concerné que les molécules à déplacement lent. Dans les deux cas le déplacement dû à l'effet Doppler du second ordre est très faible. Il est décidé que les quelques résultats obtenus avec un système d'asservissement utilisant un jet moléculaire seront corrigés de + 200 Hz afin qu'ils se rapportent aussi à des molécules quasi-stationnaires*. La valeur de la fréquence pourra ainsi s'appliquer à la majorité des systèmes pratiques.

Le groupe de travail a pu se mettre d'accord sur la valeur de la fréquence et la valeur de l'incertitude applicables soit aux systèmes à structure résolue soit aux systèmes à structure non résolue. Il en a rendu compte à l'ensemble du comité.

Laser asservi sur l'iode (473 THz, 633 nm)

Le système de laser à hélium-néon asservi sur l'iode à 473 THz, 633 nm, est, parmi ceux qui ont été recommandés, celui qui est le plus largement utilisé dans tous les laboratoires nationaux. L'INM a donné

* J. L. Hall nous a fait savoir ultérieurement par courrier que cette correction ne doit pas être appliquée car une technique avait déjà été utilisée pour supprimer le décalage dû à la distribution réelle de la vitesse des molécules.

un nouveau résultat de la mesure de fréquence effectuée au Laboratoire primaire du temps et des fréquences (LPTF), Paris. M. Juncar indique que l'écart-type déterminé sur plus de 600 mesures n'est que de 3,4 kHz (7×10^{-12}), et que le nouveau résultat se situe dans les limites d'incertitude de la valeur recommandée en 1982. M. Juncar donne aussi brièvement les résultats de deux mesures récentes de la constante de Rydberg (document CCDM/92-19n), l'une fondée sur la référence du méthane et l'autre sur la référence à 473 THz. L'accord entre ces deux résultats est excellent (écart de 3×10^{-12} , avec une incertitude de 3×10^{-11}) s'ils sont rapportés à la nouvelle fréquence du méthane et à la nouvelle valeur de l'INM à 473 THz. Le comité accueille cette information avec des applaudissements et, au nom de tous les présents, le président félicite l'INM pour l'excellence de sa contribution. Le CCDM est unanime pour retenir ces résultats et recommander la nouvelle valeur à 473 THz.

Dans le document CCDM/92-20a, le BIPM fait une proposition sur cette base et suggère de retenir une incertitude composée de 11 kHz. M. Helmcke se demande si une incertitude aussi faible peut se justifier, mais M. Chartier la considère comme justifiée compte tenu de l'accord constaté lors des nombreuses comparaisons de lasers effectuées par le BIPM au cours des dix dernières années (documents CCDM/92-20a et 92-3). Lors de ces comparaisons, le désaccord initial peut aller jusqu'à 50 kHz, mais cela vient des larges tolérances retenues dans les spécifications faites en 1982 pour les conditions de fonctionnement. On atteint presque toujours un accord à ± 10 kHz près lorsque les conditions de fonctionnement sont ajustées sur le milieu des domaines permis. En conséquence, le BIPM propose de réduire ces domaines (document CCDM/92-20a). Plusieurs participants expriment des réserves sur les tolérances proposées, les considérant comme plutôt contraignantes et difficiles à satisfaire. Il est suggéré que, si l'on donne des ordres de grandeur typiques pour l'effet des écarts par rapport aux conditions spécifiées, cela permettra aux laboratoires d'assouplir l'une ou l'autre des tolérances dans les cas où il n'est pas nécessaire d'avoir la meilleure reproductibilité. De l'avis de tous, la discussion a donné des indications suffisamment claires pour qu'un projet de recommandation soit rédigé par le même groupe de travail qui a été créé pour s'occuper de la fréquence du méthane.

Ultérieurement, le groupe de travail convient que, dans la mesure du possible, les tolérances concernant les conditions de fonctionnement de ce laser doivent être telles que la contribution à l'incertitude due à chacune de ces conditions prise séparément soit comparable à l'incertitude attribuée à la valeur de la fréquence. Toutefois, une incertitude plus grande doit être admise dans le cas de la puissance de fonctionnement, car le coefficient de variation est moins prévisible. Le groupe de travail estime aussi que la valeur recommandée pour la fréquence doit être celle qui correspond au laser BIPM4 car le grand nombre de comparaisons internationales effectuées avec ce laser indique que celui-ci donne des résultats proches de la moyenne mondiale. Sur cette base, le groupe de travail rédige un projet

de spécification pour l'obtention de la radiation de référence à 473 THz, indiquant les valeurs numériques et les conditions de fonctionnement.

Autres radiations recommandées

La liste des radiations recommandées en 1982 comportait trois systèmes de laser asservi en plus des deux systèmes dont il a déjà été question. Plusieurs autres radiations sont maintenant proposées pour figurer dans une liste révisée (document CCDM/92-3, section 3.2). Il est suggéré de supprimer dans la liste une ou plusieurs des radiations recommandées en 1982 et de la ou les remplacer par de nouvelles propositions dans la même région générale de fréquence et de longueur d'onde. Il s'avère toutefois que chacune des radiations recommandées à l'origine a suffisamment de partisans pour justifier qu'elle soit conservée.

En 1982, la fréquence de toutes ces radiations était reliée soit à la référence au méthane soit à la référence à l'iode à 473 THz. Il est donc nécessaire d'ajuster les valeurs et les incertitudes pour tenir compte des modifications proposées pour ces références. De plus, il faut tenir compte de quelques mesures interférométriques récentes de rapports de fréquences. Le comité estime que ces ajustements sont indiscutables et ils sont portés à l'attention du groupe de travail qui étudie les autres valeurs numériques. Le groupe de travail n'a pas le temps d'achever sa tâche avant la fin de la session, mais son travail est suffisamment avancé pour être mené à bien par correspondance dans les semaines qui suivent. Cela inclut bien évidemment les tableaux révisés ou complétés des différences de fréquence entre les composantes hyperfines possibles.

Nouvelles radiations

Parmi les lasers asservis qui ont été mis au point et étudiés depuis 1982, trois systèmes sont proposés par deux laboratoires ou davantage pour ajouter leur radiation à la liste des radiations recommandées. Cinq laboratoires proposent le laser à He-Ne asservi sur l'iode à 543 nm, cinq proposent le laser à He-Ne asservi sur l'iode à 640 nm et deux le laser asservi sur le calcium à 657 nm.

Le système à 543 nm est considéré comme étant d'une importance pratique particulière car la fréquence des lasers à He-Ne asservis sur la courbe de puissance que l'on utilise pour mesurer les cales étalons est déterminée par battement de fréquence. Le système à 640 nm a été mis au point grâce à une coopération entre le NIM, la PTB, le CSMU et le NPL ; le NIM rend compte de sa bonne stabilité et de sa reproductibilité. Bien qu'il ne soit pas encore très utilisé, le système au calcium semble devoir se caractériser par une reproductibilité exceptionnelle. La PTB signale que

l'on peut déjà localiser le centre de la raie avec une incertitude de 10^{-12} et que par la suite on devrait atteindre vraisemblablement 10^{-14} .

L'unanimité se fait pour inclure ces trois radiations dans la liste recommandée. Il faut encore préciser les spécifications nécessaires pour la valeur de la fréquence et de l'incertitude, les conditions de fonctionnement et les intervalles hyperfins; cette tâche est confiée au groupe de travail déjà chargé de revoir les valeurs figurant dans la liste de 1982.

Le groupe de travail établit un sous-groupe comprenant MM. Riehle, Bertinotto, Zhao Kegong, Vitushkin et Robertsson, pour rassembler les données dont on dispose sur ces radiations et faire des suggestions pour leur exploitation.

Recommandation

Vers la fin de la réunion, le groupe de travail soumet à l'ensemble du comité les résultats de ses délibérations et la compilation (incomplète) d'une liste révisée des radiations recommandées. Le projet de recommandation ne contient que les propositions concernant les radiations du laser asservi sur le méthane et à 473 THz. Ce projet est adopté sans réserve. Pour la révision des autres valeurs figurant dans la liste de 1982, les principes exposés plus haut sont aussi adoptés.

En ce qui concerne la nouvelle radiation à 543 nm, on ne dispose que de deux mesures précises dont l'incertitude est comparable. Il est proposé de prendre leur moyenne non pondérée. Pour la radiation à 640 nm on a trois mesures avec des incertitudes nettement différentes. Après discussion il est décidé qu'une moyenne pondérée sera plus appropriée dans ce cas-là. Il est convenu que l'on fera de même pour la radiation à 657 nm pour laquelle on a seulement deux mesures dont les incertitudes sont largement différentes.

En conclusion le CCDM adopte dans son principe la Recommandation M 1 (1992) incomplète et demande que le CIPM charge le CCDM d'en compléter le texte, en suivant les directives sur lesquelles le CCDM s'est mis d'accord.

3. Comparaisons internationales

Étalons d'angle

Lors de sa réunion en 1979 le CCDM avait lancé une comparaison d'étalons d'angles avec le NRLM agissant comme laboratoire pilote. Cette comparaison a été achevée en 1986 (document CCDM/92-13*t*). M. O'ishi a présenté un rapport résumé (document CCDM/92-13*a*). Onze laboratoires ont pris part à cette comparaison et ont mesuré chacun des deux polygones à douze côtés fournis par le VNIIM et le NRLM. On peut tirer un certain

nombre de conclusions de ces mesures. En particulier, on a atteint entre laboratoires une compatibilité de $\pm 0,1''$. Les différences entre laboratoires sont beaucoup plus grandes que les incertitudes statistiques à l'intérieur des laboratoires. Il ne semble pas que la différence des méthodes de mesure soit la cause de ces différences, qui sont attribuées à de faibles défauts d'alignement des instruments optiques et aux imperfections de la planéité et de l'orientation des faces des polygones. On attribue les différences entre les erreurs de mesure avec les deux polygones aux différences de dimensions de leurs faces. Cette comparaison a été l'occasion pour plusieurs laboratoires d'améliorer leurs installations de mesure.

Lasers asservis

Les réponses au questionnaire ont fait apparaître l'existence de nombreuses comparaisons de lasers, la plupart mettant en jeu des lasers asservis sur l'iode à 633 nm et le BIPM. M. Chartier rend compte des nombreuses comparaisons auxquelles le BIPM a participé. La plupart des pays membres de la Convention du Mètre ont été concernés. Il résume aussi les résultats des comparaisons de cuves à absorption d'iode qui ont été effectuées par le BIPM au cours de 1991. Quarante cuves ont été mesurées, seize donnent des résultats qui se situent à l'intérieur de ± 5 kHz de la moyenne et vingt-trois en sont à ± 10 kHz. L'incertitude de mesure est d'environ 5 kHz. Alors que la plupart des « mauvaises » cuves donnent des décalages négatifs, quelques cuves donnent paradoxalement des résultats supérieurs de 10 kHz à la moyenne. Le BIPM a rempli environ trente cuves à iode au cours des six mois qui ont précédé la présente session.

Ce rapport est accueilli avec des applaudissements pour la qualité du travail et la clarté de sa présentation. Presque tous les autres laboratoires ont indiqué leur intention de participer aux futures comparaisons de lasers et de cuves à iode. La majorité des demandes concernent les lasers à 633 nm et à 543 nm, mais une comparaison a été demandée, par un ou plusieurs laboratoires, pour chacune des radiations recommandées (sauf 576 nm).

Groupe de travail sur les comparaisons internationales (Groupe de travail du CCDM sur la métrologie dimensionnelle)

Jusqu'ici le CCDM n'avait pas estimé nécessaire d'avoir des groupes de travail, sauf ponctuellement pour rédiger des recommandations pendant les réunions. L'attention du CCDM est toutefois attirée sur la Recommandation E 1 (1992) du CCE. Celle-ci constate que de nombreuses comparaisons sont effectuées dans le cadre d'organisations régionales groupant un certain nombre de pays afin d'assurer la traçabilité des étalons et de répondre aux besoins du commerce international. Elle recommande aux participants d'informer le BIPM de ces comparaisons, de telle sorte que les résultats puissent être utilisés le cas échéant pour compléter

les comparaisons faites à l'instigation du CCE. Elle recommande aussi d'effectuer des comparaisons supplémentaires pour relier entre eux les résultats des groupes régionaux.

Plusieurs délégués sont en faveur de cette approche et tous sont d'accord pour dire que le CCDM doit adopter une conduite comparable. À cet effet il est convenu que le CCDM doit créer un groupe de travail permanent, qui sera également chargé de conseiller le CCDM sur les besoins et les priorités en ce qui concerne les comparaisons d'étalons utilisés en métrologie dimensionnelle, à organiser par le CCDM. La mission de ce groupe de travail doit être bien définie.

La composition exacte de ce groupe de travail n'a pas été décidée pendant la réunion, car certains délégués ont besoin de prendre conseil au sein de leur laboratoire. Elle sera décidée par correspondance par l'intermédiaire du BIPM. Il n'est pas nécessaire que les membres de ce groupe de travail appartiennent aux laboratoires membres du CCDM proprement dits, mais ils doivent être désignés par les laboratoires nationaux des pays membres de la Convention du Mètre. Il paraît souhaitable que chaque organisation régionale soit représentée. M. Pekelsky est proposé pour présider ce groupe de travail et en accepte la charge. MM. Brown, Sacconi et Zhao Kegong font part de leur désir d'y participer.

Après discussion, le CCDM se met d'accord sur l'énoncé suivant des missions de ce groupe, auquel est donné le nom de Groupe de travail du CCDM sur la métrologie dimensionnelle.

Groupe de travail du CCDM sur la métrologie dimensionnelle

Missions :

Assumer la liaison avec les organisations régionales de coopération en métrologie, dans le but de veiller à la participation du BIPM ou de laboratoires membres du CCDM lors des principales comparaisons régionales et assumer ainsi, à l'échelle mondiale, la traçabilité des mesures au niveau le plus élevé d'exactitude ;

Proposer au CCDM des recommandations relatives aux besoins et aux priorités en matière de comparaisons internationales complémentaires sous les auspices du CCDM ;

Servir de pivot pour l'échange d'informations relatives aux comparaisons dans le domaine des étalons et des techniques de la métrologie dimensionnelle.

Note

Le terme « métrologie dimensionnelle » s'entend comme incluant les mesures de longueur, de déplacement, d'angle, de forme et de déformation, ainsi que les grandeurs mises en jeu dans ces mesures telles que l'indice de réfraction de l'air ou le coefficient de dilatation des étalons.

Cales étalons

En réponse au questionnaire, les laboratoires ont indiqué leurs besoins en comparaisons de mesures dimensionnelles. Ces indications vont être communiquées au nouveau groupe de travail pour considération et décision à prendre. De nombreux laboratoires, toutefois, insistent sur la nécessité de faire des comparaisons de cales étalons ; une comparaison de ce type est déjà en cours dans le cadre d'EUROMET. M. Vaucher dit que la comparaison d'EUROMET porte sur des cales comprises entre 1 mm et 100 mm, et que la première série de mesures a fait apparaître quelques problèmes d'erreur de déphasage à la réflexion et des difficultés de mise en adhérence. Les résultats des mesures de la deuxième série, autant que l'on puisse en juger, étaient en accord dans une limite de ± 25 mm. M. O'ishi estime nécessaire de relier les mesures faites dans les pays de la zone Asie/Pacifique avec celles faites en Europe et ailleurs.

Il est convenu qu'une comparaison restreinte, à petite échelle, doit être commencée dès que possible. M. Vaucher accepte que l'OFMET en soit le laboratoire pilote et propose que cinq des cales étalons (1, 3, 8, 40 et 100 mm) ayant fait l'objet de la comparaison d'EUROMET puissent être utilisées. Les délégués du CSMU, du NIST, du CSIRO et du NIM sont d'accord pour participer à une liaison entre les régions de l'Europe centrale et de l'est, de l'Amérique du nord et de la zone Asie/Pacifique.

4. Travaux du BIPM

M. Quinn demande l'avis du CCDM sur l'équilibre du programme de travail du BIPM, tel qu'il a été approuvé par la 19^e CGPM. Ces travaux se répartissent en trois catégories :

comparaisons internationales,

communication du savoir-faire aux laboratoires membres (conseils techniques et « bonne pratique » reconnue) et

une somme modeste de travaux de recherche pour maintenir le savoir-faire.

Le rôle essentiel du BIPM en ce qui concerne les comparaisons de lasers a déjà été reconnu, et il est admis que cela doit se poursuivre et être étendu en particulier à la nouvelle radiation à 543 nm. Il a été admis, toutefois, que le BIPM ne peut conserver des lasers pour tous les types de radiations recommandées, et ne doit pas entreprendre de travaux sur des sources nouvelles en cours d'étude ailleurs. On a reconnu la nécessité de poursuivre les recherches sur le problème de la contamination des cuves à absorption d'iode, et il est demandé au BIPM d'intensifier son action dans ce domaine, pour y inclure peut-être la spectrométrie de masse et l'utilisation de lasers asservis avec cuve externe.

Le BIPM conserve encore une installation pour étalonner des règles étalons à traits et des étalons à bouts de grande dimension; mais cet équipement est rarement utilisé et aurait besoin d'une importante remise en état. Il est difficile pour le BIPM de conserver son savoir-faire lorsqu'un petit nombre seulement de mesures est fait. Compte tenu que des installations de ce type existent dans les laboratoires nationaux, on estime que le BIPM doit peu à peu abandonner ces activités.

5. Questions diverses

Parmi les questions abordées, celle d'éventuelles comparaisons de réseaux optiques linéaires et d'étalons sub-micrométriques est soumise à l'étude de Groupe de travail sur la métrologie dimensionnelle. Pour mesurer des distances supérieures à 25 m, on utilise normalement des mesures de temps de vol et l'indice de réfraction de l'air pose un problème. On utilise souvent la formule de Edlén, mais on a besoin maintenant d'une formulation plus exacte fondée sur des données mises à jour. Elle ne s'applique pas non plus à l'important domaine de l'infrarouge. D'autres organisations sont aussi concernées par l'indice de réfraction; la question peut aussi être étudiée par le nouveau groupe de travail. Les grandes distances (supérieures à 50 km) sont maintenant mesurées par des méthodes chronométriques à partir de satellites terrestres (Global Positioning System). Il semble dans ce contexte que les questions de chronométrie sont plutôt de la compétence du CCDS. L'attention des participants est attirée sur une proposition en cours de discussion au sein de l'ISO d'utiliser 23 °C au lieu de 20 °C comme température de référence pour les mesures de longueur. Tout changement dans ce sens risque, par exemple, de donner une grande importance aux mesures de coefficient de dilatation. Il est conseillé aux participants d'en informer leurs collègues et de leur faire connaître l'éventuelle nécessité de poursuivre les recherches sur les mesures de dilatation.

Le CCDM note que, pour certains domaines de la métrologie fondamentale, les radiations recommandées figurant dans la liste ont une exactitude à peine suffisante. De nombreux laboratoires sont donc engagés dans la mise au point de références améliorées et le CCDM souhaite encourager cette activité. On note aussi que l'amélioration apportée à la connaissance des incertitudes, maintenant recommandées, sur les radiations est due principalement à la mise au point de techniques hétérodynes et de techniques de mélange de fréquences pour la mesure des fréquences de lasers. Il est important d'étendre l'application de ces techniques et de la rendre plus facile, afin d'assurer la liaison avec les références améliorées en cours de mise au point actuellement. À cet effet, le CCDM adopte la Recommandation M 2 (1992).

Avant de clore la session, le président suggère que le comité se réunisse dans deux ans environ. Il remercie les délégués pour leur contribution active et coopérative, M. Helmcke et les autres membres du groupe de travail pour leurs efforts efficaces, M. Rowley pour avoir accepté d'être rapporteur et le BIPM pour son hospitalité et l'excellente organisation de la réunion. M. Hall rappelle avec regret le récent décès de M. Chebotayev, dont les travaux sur l'étalon du méthane, sur les techniques de spectroscopie non linéaire sans effet Doppler et sur les techniques optiques de Ramsey ont largement influencé les travaux de ce comité. M. Xu Yi remercie aussi tous ceux qui ont contribué à l'organisation de la réunion et rend hommage à l'excellente collaboration au niveau international dont ce comité fait preuve. Il fait don au BIPM d'un laser émettant une radiation à 640 nm, laquelle vient juste d'être ajoutée à la liste des radiations recommandées.

Enfin M. Giacomo félicite le président pour la façon dont il a mené les travaux de cette 8^e session du CCDM.

Octobre 1992

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

Révision de la mise en pratique de la définition du mètre

RECOMMANDATION M 1 (1992)*

Le Comité consultatif pour la définition du mètre,

rappelant

— que la 17^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM), en 1983, a adopté une nouvelle définition du mètre,

— que la même CGPM a invité le Comité international des poids et mesures (CIPM)

— à établir des instructions pour la mise en pratique de cette définition,

— à choisir des radiations qui puissent être recommandées comme étalons de longueur d'onde pour les mesures de longueur par interférométrie et à donner les instructions nécessaires pour leur utilisation,

— à poursuivre les études nécessaires pour améliorer ces étalons et à étendre ou réviser ces instructions en temps utile, si besoin est,

— que le CIPM, en conséquence, a publié en 1983 une liste des radiations recommandées pour la mise en pratique de la définition du mètre,

considérant

— que les sciences et les techniques continuent à exiger une exactitude croissante des réalisations du mètre,

— que, depuis 1983, les travaux effectués dans les laboratoires nationaux, au BIPM et ailleurs ont amélioré de façon substantielle la

* Cette recommandation a été approuvée par le CIPM à sa 81^e session comme Recommandation 3 (CI-1992), voir page M 15.

reproductibilité des radiations qui peuvent être utilisées pour la mise en pratique de la définition du mètre,

— que ces travaux ont aussi permis de réduire notablement l'incertitude associée à la valeur de la fréquence et de la longueur d'onde de certaines de ces radiations,

recommande que la liste des radiations recommandées par le CIPM en 1983 soit révisée.

Études à poursuivre

RECOMMANDATION M 2 (1992)

Le Comité consultatif pour la définition du mètre,

considérant

— que les besoins scientifiques et techniques exigent en permanence des réalisations du mètre de plus en plus exactes,

— que les besoins de la métrologie dimensionnelle de haut niveau continuent de croître,

— que de meilleures méthodes sont nécessaires pour améliorer l'exactitude des comparaisons de fréquence et de longueur d'onde, en particulier entre le domaine des microondes et celui des rayonnements visibles;

recommande que les laboratoires nationaux

— continuent à entretenir et à perfectionner les techniques propres à satisfaire les besoins croissants en métrologie dimensionnelle,

— poursuivent leurs efforts pour mettre au point et étudier les caractéristiques métrologiques de nouveaux étalons de longueur, de longueur d'onde et de fréquence fondés sur des techniques telles que l'utilisation d'ions ou d'atomes piégés ou refroidis, de jets atomiques ou moléculaires lents, de lasers à l'état solide ou de diodes-lasers à semi-conducteurs,

— poursuivent leurs efforts pour perfectionner les techniques de génération d'harmoniques et de mélange de fréquences en vue d'améliorer l'exactitude et la facilité des comparaisons de fréquences.

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

Révision de la mise en pratique de la définition du mètre

RECOMMANDATION 3 (CI-1992)*

Le Comité international des poids et mesures,

rappelant

— que la 17^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM), en 1983, a adopté une nouvelle définition du mètre,

— que la même CGPM a invité le Comité international des poids et mesures (CIPM)

— à établir des instructions pour la mise en pratique de cette définition,

— à choisir des radiations qui puissent être recommandées comme étalons de longueur d'onde pour les mesures de longueur par interférométrie et à donner les instructions nécessaires pour leur utilisation,

— à poursuivre les études nécessaires pour améliorer ces étalons et à étendre ou réviser ces instructions en temps utile, si besoin est,

— que le CIPM, en conséquence, a publié en 1983 une liste des radiations recommandées pour la mise en pratique de la définition du mètre,

considérant

— que les sciences et les techniques continuent à exiger une exactitude croissante des réalisations du mètre,

* Le CIPM a adopté la Recommandation M 1 (1992) comme Recommandation 3 (CI-1992), avec la Liste des radiations recommandées, 1992, mise au point après la 8^e session du CCDM.

— que, depuis 1983, les travaux effectués dans les laboratoires nationaux, au BIPM et ailleurs, ont amélioré de façon substantielle la reproductibilité des radiations qui peuvent être utilisées pour la mise en pratique de la définition du mètre,

— que ces travaux ont aussi permis de réduire notablement l'incertitude associée à la valeur de la fréquence et de la longueur d'onde de certaines de ces radiations,

décide que la liste des radiations recommandées par le CIPM en 1983 (Recommandation 1 (CI-1983)) soit remplacée par la liste des radiations recommandées donnée ci-après.

LISTE DES RADIATIONS RECOMMANDÉES, 1992

Cette liste remplace celle qui avait été publiée dans *BIPM Proc.-Verb. Com. int. poids et mesures*, 1983, **51**, 25-28 et dans *Metrologia*, 1984, **19**, 165-166.

Dans cette liste, les valeurs de la fréquence f et de la longueur d'onde λ (d'une même radiation) devraient être liées exactement par la relation $\lambda f = c$, avec $c = 299\,792\,458$ 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, 1992, 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. 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, suivant la méthode d'asservissement, qui sont décrites dans de nombreuses publications scientifiques ou techniques. Des exemples de conditions expérimentales considérées comme convenables sont décrits, pour telle ou telle radiation, dans des publications dont les références peuvent être obtenues auprès des laboratoires membres du CCDM ou auprès du BIPM.

** Voir Annexe M 2, page M 36.

1. Radiations de lasers asservis

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

1.1.1 Les valeurs $f = 88\,376\,181\,600,18$ kHz,
 $\lambda = 3\,392\,231\,397,327$ fm,

avec une incertitude-type relative estimée de 3×10^{-12} , s'appliquent à la radiation émise par un laser à He-Ne asservi à l'aide de la composante centrale du triplet de structure hyperfine résolu [transition (7-6)], en utilisant la moyenne de la structure due à l'effet de recul, pour des molécules réellement stationnaires, dont les valeurs sont corrigées pour tenir compte du déplacement Doppler du second ordre.

1.1.2 Les valeurs $f = 88\,376\,181\,600,5$ kHz,
 $\lambda = 3\,392\,231\,397,31$ fm,

avec une incertitude-type relative estimée 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 d'une cuve à méthane à la température ambiante, située à l'intérieur ou à l'extérieur du laser, lorsque les conditions suivantes sont respectées :

- pression du méthane ≤ 3 Pa,
- puissance surfacique moyenne sur l'axe transportée par le faisceau dans un seul sens, à l'intérieur de la cavité⁺ $\leq 10^4$ 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 placé à la sortie du côté du tube laser.

1.2 Atome absorbant ⁴⁰Ca, transition ³P₁ – ¹S₀; $\Delta m_J = 0$.

Les valeurs $f = 455\,986\,240,5$ MHz,
 $\lambda = 657\,459\,439,3$ fm,

avec une incertitude-type relative estimée de $4,5 \times 10^{-10}$, s'appliquent à la radiation émise par un laser asservi à l'aide d'un jet atomique thermique.

1.3 Molécule absorbante ¹²⁷I₂, transition 8-5, P(10), composante a₉ (ou g).

Les valeurs $f = 468\,218\,332,4$ MHz,
 $\lambda = 640\,283\,468,7$ fm,

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

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

Les valeurs $f = 473\,612\,214\,705\text{ kHz}$,
 $\lambda = 632\,991\,398,22\text{ fm}$,

avec une incertitude-type relative estimée de $2,5 \times 10^{-11}$, 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, 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, de crête à creux : $(6 \pm 0,3)\text{ MHz}$
- puissance transportée par le faisceau dans un seul sens, à l'intérieur de la cavité⁺ : $(10 \pm 5)\text{ mW}$, pour une valeur absolue du coefficient de décalage en fonction de la puissance $\leq 1,4\text{ kHz/mW}$.

Ces conditions ne suffisent pas par elles-mêmes à garantir l'obtention de l'incertitude-type indiquée. Il faut en outre que 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 (1992).

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

Les valeurs $f = 489\,880\,354,9\text{ MHz}$,
 $\lambda = 611\,970\,770,0\text{ fm}$,

avec une incertitude-type relative estimée 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 17-1, P(62), composante a_1 .

Les valeurs $f = 520\,206\,808,4\text{ MHz}$,
 $\lambda = 576\,294\,760,4\text{ fm}$,

avec une incertitude-type relative estimée 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 $(6 \pm 2)^\circ\text{C}$.

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

Les valeurs $f = 551\,579\,482,96$ MHz,
 $\lambda = 543\,516\,333,1$ fm,

avec une incertitude-type relative estimée 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 $(0 \pm 2)^\circ\text{C}$.

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

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

avec une incertitude-type relative estimée 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 $(-5 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Note

⁺ La puissance transportée par le faisceau, dans un seul sens, à l'intérieur de la cavité, est obtenue en divisant la puissance de sortie par le facteur de transmission du miroir de sortie.

2. Radiations de lampes spectrales

2.1 Radiation correspondant à la transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ de l'atome de ^{86}Kr .

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

avec une incertitude globale relative estimée de $\pm 4 \times 10^{-9}$ [égale à trois fois l'écart-type estimé à $1,3 \times 10^{-9}$ en valeur relative], s'applique à la radiation émise par une lampe utilisée dans les conditions recommandées par le CIPM (*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)].

2.2 Les radiations des atomes de ^{86}Kr , ^{198}Hg et ^{114}Cd recommandées par le CIPM en 1963 (*BIPM Com. cons. déf. mètre*, 1962, **3**, 18-19 et *BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1963, **52**, 26-27), avec les valeurs indiquées pour leur longueur d'onde et pour l'incertitude correspondante.

ANNEXE M 1

Documents de travail présentés à la 8^e session du CCDM*

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

Document
CCDM/

- 92-1 Questionnaire, 2 p.
- 92-2 BIPM, CHARTIER J.-M., PICARD-FREDIN S., CHARTIER A., International Comparison of Iodine Cells, *Rapport BIPM-92/4*, 1992, 17 p. + annexes.
- 92-3 BIPM analysis of laboratories' responses to the questionnaire, revised November 1992, 42 p.

NRC (Canada)

- 92-4 a. Response to the questionnaire, 13 p.
- b. WHITFORD B. G., HANES G. R., Frequency of a Methane-stabilized Helium-neon Laser, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1988, **IM-37**, 179-184.

CSIRO (Australie)

- 92-5 a. Response to the questionnaire, 3 p.
- b. CIDDOR P. E., RUEGER J. M., Refractive Index of Air: Are New Equations Needed?, 4 p.
Appendix A. First Velocity Correction for Precise Electro-optical Distance Measurement, 3 p.
- c. Current Projects at CSIRO Australia related to CCDM interests, 1 p.

* Les documents sont classés par laboratoire et numérotés de manière alphabétique, le document *a* correspondant toujours à la réponse au questionnaire envoyé par le BIPM.

Document
CCDM/

IMGC (Italie)

92-6 a. Response to the questionnaire, 7 p.

- b. BERTINETTO F., SASSI M. P., BAVA E., GODONE A., Frequency Stability and Reproducibility Measurements of $^3\text{He}^{22}\text{Ne}/\text{CH}_4$ Stabilized Lasers, *Alta Frequenza*, 1984, **LIII**, 231-235.
- c. BERTINETTO F., PICOTTO G. B., CORDIALE P., FONTANA S., He-Ne Laser at 612 nm Stabilized to $^{127}\text{I}_2$ Using FM Spectroscopy, In *Proc. of the Fourth Symposium, Frequency Standards and Metrology, Ancona, 5-9 Sept. 1988*, Berlin: Springer-Verlag, 1988, 465-466.
- d. GODONE A., SASSI M. P., CALDERA C., BAVA E., Frequency Measurement of the NH_3 81,5 and 263,4 μm Lines, *Optics Commun.*, 1989, **71**, 59-60.
- e. SASSI M. P., BERTINETTO F., GODONE A., BAVA E., Frequency Measurement of the CO_2R_1 (32) Line with Respect to a 3,39 μm $\text{He}^{22}\text{-Ne}/\text{CH}_4$ Standard, *Int. J. Infra. Milli. Waves*, 1985, **6**, 629-633.
- f. SASSI M. P., BERTINETTO F., GODONE A., BAVA E., Frequency Measurement of RuO_4 Transitions in the ν_3 Vibrational Band, *Optics Commun.*, 1986, **60**, 376-377.
- g. SNELS M., SASSI M. P., QUACK M., High-resolution Fourier-transform Infrared Spectroscopy of the ν_3 (F_2) Fundamental of RuO_4 , *Mol. Phys.*, 1991, **72**, 145-158.
- h. ZINK L. R., SASSI M. P., PREVEDELLI M., PAVONE F. S., Direct Frequency Measurements of OsO_4 ν_3 -Q Branch Lines near the 10 μm R(0) CO_2 Laser Line, *The 14th International Conference on Infrared and Millimeter Waves, Würzburg, 2-6 Oct. 1989, Conference Digest*, M. Von Ortenberg ed., 1989, **1240**, 113-114.
- i. SASSI M. P., Spettroscopia Sub-doppler di Molecole a Simmetria Sferica: Applicazioni alla Sintesi di Frequenza nella Regione dei 10 μm , *Tesi Dottorato di Ricerca in Metrologia*, 1987, pp. 4.40 et 5.22.
- j. SASSI M. P., GODONE A., BERTINETTO F., Mixing Properties of MIM Diodes in the Infrared, Plenum, 1987, 291-297.
- k. BERTINETTO F., CORDIALE P., FONTANA S., PICOTTO G. B., Recent Progresses in He-Ne Lasers Stabilized to $^{127}\text{I}_2$, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1985, **IM-34**, 256-261.

Document
CCDM/

- 92-6 *l.* BERTINETTO F., CORDIALE P., FONTANA S., PICOTTO G. B., Helium-neon Lasers Stabilized to Iodine at 605 nm, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1987, **IM-36**, 609-612.
- m.* GODONE A., SASSI M. P., BAVA E., High Accuracy Capabilities of an OsO₄ Molecular-beam Frequency Standard, *Metrologia*, 1989, **26**, 1-8.

VNIIM (Fédération de Russie)

- 92-7 *a.* Response to the questionnaire, 3 p.
- b.* VITUSHKIN L. F., KOROTKOV V. I., PUL'KIN S. A., A Laser Interference Diffractometer for Period Measurement of Diffraction Gratings and Periodic Small-Length Line Scales, 8 p.
- c.* VITUSHKIN L. F., ZEILIKOVICH I. S., KOROTKOV V. I., PUL'KIN S. A., Laser Interference-diffractometric Comparator for Measurement of Periodic Small-length Line Scales, 11 p.
- d.* VITUSHKIN L. F., KOROTKOV V. I., LAZARYUK S. V., PUL'KIN S. A., TOPTYGINA G. I., Narrow Resonances of Atomic Medium Polarization in a Strong Polyharmonic Field and their Application for Producing Frequency References, 29 p.

LEBEDEV INSTITUTE (Fédération de Russie)

- 92-8 *a.* Response to the questionnaire, 4 p.
- b.* GUBIN M. A., TYURIKOV D. A., KOVAL'CHUK E. V., SCHELKOVNIKOV A. S., Computer Controlled Transportable Optical Frequency Standard with the Reproducibility $\sim 10^{-13}$, *CPEM'92 Digest*, 1992, 38-39.
- c.* BASOV N. G., GUBIN M. A., NIKITIN V. V., NIKUL'CHIN A. V., PROTSENKO E. D., TYURIKOV D. A., SCHELKOVNIKOV A. S., Transportable Optical Frequency Standard and Results of its Metrological Tests, *Sov. J. Quantum Electron.* (traduction), 1987, **17**, 545-547.

VNIIFTRI (Fédération de Russie)

- 92-9 *a.* Material concerning the He-Ne/CH₄ laser absolute frequency, 2 p.

Document
CCDM/

NIM (République populaire de Chine)

92-10 a. Response to the questionnaire and Research Findings in Realizing the Definition of the Metre. Measurement/Intercomparison of Frequency (Wavelength) and Geometrical Standard of Length, 32 p.

92-10-1 a. Voir document CCDM/92-18b.

b. Comparison of Iodine Stabilized He-Ne Laser Between China and New Zealand, 1 p.

c. AN Jialuan, LI Chengyang, LIU Xiuying, The Improvements and the International Comparison of the 633 nm $^{127}\text{I}_2$ Stabilized He-Ne Laser, 4 p.

d. Voir document CCDM/92-2.

e. Iodstabilisierter Argon-ionenlaser der Wellenlänge 514,5 nm nach dem Frequenz-Modulations-Verfahren, 2 p.

f. LIU Lingling,, BRAND U., The Frequency Stabilization of Ar^+ Laser at 515 nm (en chinois), *Chin. J. Quant. Elect.*, 1991, **8**, 281-283 (+ traduction en anglais).

g. LIU Lingling,, BRAND U. (rapport en chinois), 4 p.

h. NI Yucai, QIAN Jin, ZHAO Kegong, CHEN Rong, LI Yimin, WANG Qingji, Frequency Stabilization of 780,1 nm Semiconductor Laser Using Saturated Absorption Line of ^{85}Rb , 8 p.

i. CHEN Rong, WANG Qingji, QIAN Jin, NI Yucai, ZHAO Kegong, Frequency Stabilization of Semiconductor Laser by Overtone Spectrum of Molecule (en chinois), *Acta Metrologia Sinica*, 1992, **13**, 88-92.

j. LIU Zhong-You, ZHOU Zu-Lian, MA Ming-De, YANG Fen-Liang, LI Yin-Zhu, LIU Xiu-Ying, Accurate Measurements of the Wavelength Ratios in Vacuum between Methane and Iodine Stabilized He-Ne Lasers (en chinois), *Acta Metrologia Sinica*, 1984, **5**, 188-193.

92-10-2 a. DSHAO Kegung, XU Jie, LI Chen-Yang, LIU Han-Tian, Hyperfine Structure in Iodine Observed at the 612 nm and 640 nm ^3He - ^{22}Ne Laser Wavelengths (en chinois), *Yanjiu Jianbao*, s.d., 322-323.

- 92-10-2 b. ZHAO K. G., HELMCKE J., Jodstabilisierter ^3He - ^{22}Ne Laser für 640 nm Wellenlänge, Abteilung 1, *PTB Jahresbericht*, 1983, 116-117.
- c. ZHAO K. G., BLABLA J., HELMCKE J., $^{127}\text{I}_2$ -stabilized ^3He - ^{22}Ne Laser at 640 nm Wavelength, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1985, **IM-34**, 252-256.
- d. ZHAO Kegong, LI Hua, Hyperfine Structure of Iodine at 640 nm ^3He - ^{22}Ne Laser Wavelength and Identification (en chinois), *Acta Optica Sinica*, 1983, **3**, 673-677.
- e. ZHAO Kegong, LI Hua, Analysis and Calculation of Hyperfine Lines of Iodine Molecule (en chinois), *Acta Optica Sinica*, 1985, **6**, 83-88.
- f. ZHAO Kegong, LI Chengyang, LI Hua, XU Jie, WANG He, Investigations of $^{127}\text{I}_2$ Stabilized He-Ne Laser at 640 nm (en anglais), *Acta Metrologica Sinica*, 1987, **8**, 88-95.
- 92-10-4 a. XU Yi, YE Xiaoyou, LI Chengyang, XU Jie, GAO Feng, Precise Determination of 633 nm He-Ne Laser Wavelength in Air (en anglais), 4 p.
- b. Asia/Pacific Metrology Programme, Final Report on Inter-comparison of a Line Standard of Length (en anglais), 5 p.
- c. Measurement Report on a Quartz Scale (160 mm long) (NIM) (en anglais), 3 p.
- d. Measurement report on a 1 metre scale (NIM) (en anglais), 4 p.
- e. Report on the International Intercomparison of Gauge Blocks between China and Germany (en chinois), 5 p.
- f. Report on the International Intercomparison of Gauge Blocks between China and Germany (en anglais), *NIM Report*, 29 August 1991, 5 p.
- g. Report on the measurement of the Gauge Blocks with the Nominal Length 100 mm, 500 mm and 1000 mm (ASMW), 1988, 6 p.
- h. Report on Angle Standards and Polygons (en chinois), 26 p.
- i. Report on Angle Standards and Polygons (en chinois), 18 p.

Document
CCDM/

NIST (É.-U. d'Amérique)

92-11 a. Response to the questionnaire, 2 p.

NPL (Royaume-Uni)

92-12 a. Response to the questionnaire, 6 p.

- b. PETLEY B. W., A Note on the Uncertainty of Realizing the Metre, 2 p.
- c. BARWOOD G. P., ROWLEY W. R. C., Characteristics of a $^{127}\text{I}_2$ -Stabilized Dye Laser at 576 nm, *Metrologia*, 1984, **20**, 19-23.
- d. BENNET S. J., MILLS-BAKER P., Iodine Stabilized 640 nm Helium-neon Laser, *Optics Commun.*, 1984, **51**, 322-324.
- e. BARWOOD G. P., GILL P., ROWLEY W. R. C., Frequency Measurements on Optically Narrowed Rb-stabilized Laser Diodes at 780 nm and 795 nm, *Appl. Phys.*, 1991, **B 53**, 142-147.
- f. BARR J. R. M., GIRKIN J. M., FERGUSON A. I., BARWOOD G. P., GILL P., ROWLEY W. R. C., THOMPSON R. C., Interferometric Frequency Measurements of $^{130}\text{Te}_2$ Transitions at 486 nm, *Optics Commun.*, 1985, **54**, 217-221.
- g. BARWOOD G. P., ROWLEY W. R. C., GILL P., FLOWERS J. L., PETLEY B. W., Interferometric Measurements of $^{130}\text{Te}_2$ Reference Frequencies for 1S-2S Transitions in Hydrogenlike Atoms, *Phys. Rev.*, 1991, **A43**, 4783-4790.
- h. ROWLEY W. R. C., Power Shifts of a 633 nm $^{127}\text{I}_2$ Stabilized He-Ne Laser, for Various Mirror Curvatures, *NPL Report*, 1981, **MOM56**, 1-18.
- i. SCHELLEKENS P., WILKENING G., REINBOTH F., DOWNS M. J., BIRCH K. P., SPRONCK J., Measurements of the Refractive Index of Air Using Interference Refractometers, *Metrologia*, 1986, **22**, 279-287.
- j. BIRCH K. P., DOWNS M. J., The Results of a Comparison between Calculated and Measured Values of the Refractive Index of Air, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1988, **21**, 694-695.

NRLM (Japon)

- 92-13 a. Response to the questionnaire, 5 p.
- b. Present Status of Ca Stabilized Dye Laser by Means of Optical Ramsey Resonance, 8 p.
- c. ISHIKAWA J., ITO N., TANAKA K., Accurate Wavelength Meter for CW Lasers, *Appl. Optics*, 1986, **25**, 639-643.
- d. ITO N., ISHIKAWA J., MORINAGA A., Frequency Locking a Dye Laser to the Central Optical Ramsey Fringe in a Ca Atomic Beam and Wavelength Measurement, *J. Opt. Soc. Am.*, 1991, **B8**, 1388-1390.
- e. MORINAGA A., ITO N., SUGIYAMA K., A Dye Laser Spectrometer with an External Iodine Cell Designed for Optical Ramsey Fringe Spectroscopy in a Ca Atomic Beam, *Jap. J. Appl. Phys.*, 1990, **29**, L1727-L1730.
- f. MORINAGA A., SUGIYAMA K., ITO N., HELMCKE J., Hyperfine Structure of Low-lying Vibrational Levels in the *B* Electronic State of Molecular Iodine, *J. Opt. Soc. Am.*, 1989, **B6**, 1656-1659.
- g. SUGIYAMA K., MORINAGA A., Frequency Stabilization of a Dye Laser to a Reference Cavity with Sub-Hertz Relative Linewidth, *Jap. J. Appl. Phys.*, 1991, **30**, L1811-L1814.
- h. IWASAKI S., CHARTIER J.-M., Comparison of the $^{127}\text{I}_2$ Stabilized He-Ne Lasers at 633 nm Wavelength of the National Research Laboratory of Metrology of Japan and the Bureau International des Poids et Mesures, *Metrologia*, 1989, **26**, 257-261.
- i. MATSUMOTO H., Report on the Round-Robin Measurement of Gauge Blocks in 1990, *Bul. NRLM*, 1991, **40**, 172.
- k. MATSUMOTO H., Length Measurement of Long Gauge Blocks Using a CO_2 Laser Interferometer, *Bul. NRLM*, 1989, **38**, 69-71.
- l. WARD B. K., SETA K., Quasimonochromatic White Light Fringe Interferometer, *Appl. Optics*, 1991, **30**, 66-71.
- m. HATSUZAWA T., TOYODA K., TANIMURA Y., A Metrological Electron Microscope System for Microfeatures of Very Large Scale Integrated Circuits, *Rev. Sci. Instrum.*, 1990, **61**, 975-979.

Document
CCDM/

- 92-13
- n.* HATSUZAWA T., TOYODA K., Critical Dimension Measurements by Electron and Optical Beams for the Establishment of Linewidth Standards., *Proc. IEEE 1992 Int. Conference on Microelectronic Test Structures*, 1992, **5**, 180-184.
 - o.* TANAKA M., YAMAGAMI T., NAKAYAMA L., Linear Interpolation of Periodic Error in a Heterodyne Laser Interferometer at Subnanometer Levels, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1989, **38**, 552-554.
 - p.* MATSUMOTO H., The Refractive Index of Moist Air in the 3 μm Region, *Metrologia*, 1982, **18**, 49-52.
 - q.* MATSUMOTO H., The Refractivities of Water Vapour for CO₂ Laser Lines, *Optics Commun.*, 1984, **50**, 356-358.
 - r.* MATSUMOTO H., The Refractivity of CO₂ Gas in the Region of 10 μm , *Appl. Phys.*, 1987, **B44**, 147-149.
 - s.* ZHU Y., MATSUMOTO H., O'ISHI T., Long-arm Two-color Interferometer for Measuring the Change of Air Refractive Index, *SPIE, Optics in Complex Systems*, 1990, **1319**, 538-539.
 - t.* Report of International Comparison of Angle Standards, 1990, 174 p. + annexes.
 - u.* Work on Ion Trap at the National Research Laboratory of Metrology, 3 p.
- CARTY T., HONDA T., MATSUMOTO H., Frequency Stabilization of Frequency-doubled YVO₄ Laser Light Using Molecular Iodine Absorption, 2 p.

PTB (Allemagne)

- 92-14
- a.* Response to the questionnaire, 7 p.
 - b.* WEISS C. O., KRAMER G., LIPPARDT B., GARCIA E., Frequency Measurement of CH₄ Hyperfine Line at 88 THz/ "Optical Clock", *IEEE J. Quant. Electr.*, 1988, **24**, 1970-1972.
 - c.* KRAMER G., WEISS C. O., LIPPARDT B., Coherent Frequency Measurements of the Hfs-resolved Methane Line, In *Frequency Standards and Metrology*, A. de Marchi ed., Berlin: Springer-Verlag, 1989, 181-186.
 - d.* KRAMER G., LIPPARDT B., WEISS C. O., Coherent Frequency Synthesis in the Infrared, *Proc. of the 1992 IEEE Frequency Control Symposium*, 27-29 May 1992, Hershey P.A., 39-43.

- 92-14 e. MORINAGA A., RIEHLE F., ISHIKAWA J., HELMCKE J., A Ca Optical Frequency Standard: Frequency Stabilization by Means of Nonlinear Ramsey Resonances, *Appl. Phys.*, 1989, **B48**, 165-171.
- f. HELMCKE J., MORINAGA A., ISHIKAWA J., RIEHLE F., Optical Frequency Standards, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1989, **38**, 524-532.
- g. SCHNATZ H., OHSHIMA S., TELLE H. R., RIEHLE F., Extension of the PTB Frequency Chain Towards the Ca Intercombination Line at 657 nm, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**, 273-275.
- h. HELMCKE J., SNYDER J. J., MORINAGA A., MENSING F., GLÄSER M., New Ultra-high Resolution Dye Laser Spectrometer Utilizing a Non-tunable Reference Resonator, *Appl. Phys.*, 1987, **B43**, 85-91.
- i. BÖNSCH G., NICOLAUS A., BRAND U., Wellenlängenbestimmung der Ca-InterKombinationslinie mit dem Michelson-Interferometer der PTB, *PTB Mitteilungen*, 1989, **99**, 329-334.
- j. BRAND U., Ein iodstabilisiertes He-Ne-Laser-Wellenlängennormal grüner Strahlung, *PTB Bericht*, 1991, **Opt. 34**, 1-109.
- k. BRAND U., HELMCKE J., Frequency Stabilization of a 543,5 nm Wavelength He-Ne Laser to an Iodine Line, In *Frequency Standards and Metrology*, A. de Marchi ed., Berlin: Springer-Verlag, 1989, 467-468.
- l. BÖNSCH G., NICOLAUS A., BRAND U., Wellenlängenbestimmung für den I₂-stabilisierten He-Ne Laser bei 544 nm, *PTB Jahresbericht*, 1991, 173-174.
- m. Voir document CCDM/92-10-2c.
- n. BÖNSCH G., GLÄSER M., SPIEWECK F., Bestimmung der Wellenlängenverhältnisse von drei ¹²⁷I₂-stabilisierten Lasern bei 515 nm, 612 nm, und 633 nm, *PTB Jahresbericht*, 1986, 161.
- o. WITTE A., KISTERS Th., RIEHLE F., HELMCKE J., A Laser-cooled Calcium Atomic Beam for Use in Optical Frequency Standards and Atomic Interferometry, *CPEM'92 Digest*, 1992, 30-31.

Document
CCDM/

- 92-14 p. ANDREAE T., KÖNIG W., WYNANDS R., MESCHEDE D., HÄNSCH T. W., An Absolute Frequency Measurement of the 1S-2S Transition in Atomic Hydrogen, document présenté à l'International Conference on Atomic Physics (ICAP), München, août 1992, 2 p.
- q. Voir document CCDM/92-18b.
- r. PETRU F., POPELA B., VESELA Z., DARNEDDE H., HELMCKE J., Intercomparison of I₂ Stabilized He-Ne Lasers ($\lambda = 633$ nm) of the Institute of Scientific Instruments, CSSR, and the Physikalisch-Technische Bundesanstalt, FRG, *Metrologia*, 1990, **27**, 19-23.
- s. Voir document CCDM/92-20q.
- t. Voir document CCDM/92-20y.
- u. ANDREAE T., KÖNIG W., WYNANDS R., LEIBFRIED D., SCHMIDT-KALER F., ZIMMERMANN C., MESCHEDE D., HÄNSCH T. W., Absolute Frequency Measurement of the Hydrogen 1S-2S Transition and a New Value of the Rydberg Constant, *Phys. Rev. Letters*, 1992, **69**, 1923-1926.

CSMU (Tchéco-Slovaquie)

- 92-15 a. Response to the questionnaire, 6 p., + Complement, 2 p.
- b. Voir document CCDM/92-20q.
- c. NAVRATIL V., FODREKOVA A., TOMANYICZKA K., BANRETI E., Porovnanie Jodom Stabilizovanych HeNe Laserov 633 nm medzi CSMU Bratislava a OMH Budapest, *Jemna Mechanika a Optika*, 1991, 317-321.
- d. BLABLA J., CHARTIER J.-M., ROBERTSSON L., SOMMER M., SMYDKE J., TSCHIRNICH J., VITUSHKIN L. F., ZAKHARENKO J., ZELENY V., ZIEGLER M., Mezinarodni Porovnavani Jodem Stabilizovanych Helio-Neonovych Laseru na Vlnove delce 633 nm, *Československa Standardizace*, 1989, **14**, 453-458.
- e. BLABLA J., BARTOS M., SMYDKE J., WEBER T., Laserova Zakladna CSMU pro Realizaci nove Definice Zakladni Jednotky Delky, *Československa Standardizace*, 1985, **10**, 147-151.

Document
CCDM/

- 92-15 f. BLABLA J., SMYDKE J., CHARTIER J.-M., GLÄSER M., Comparison of the $^{127}\text{I}_2$ -stabilized He-Ne Lasers at 633 nm Wavelength of the Czechoslovak Institute of Metrology and the Bureau International des Poids et Mesures, *Metrologia*, 1983, **19**, 73-75.
- g. ZIEGLER M., BALLING P., SMYDKE J., BLABLA J., Helium-Neon Laser at 633 nm Wavelength Stabilized to Zero Transitions of the Fifth Harmonic Signals of the HFS of an Iodine Molecule, *CPEM'92 Digest*, 1992, 156-157.
- h. Voir document CCDM/92-10-2c.
- i. BLABLA J., BARTOS M., SMYDKE J., WEBER T., Maßvergleich der Frequenzstabilisierten He-Ne/J₂ Laser des ASMW and des CSMU, *Metrologische Abhandlungen*, 1983, **3**, 285-290 (+ annexe, 2 p.).
- j. BLABLA J., Helium-Neon 633 nm by Iodine Stabilized Laser — Metrological Properties, Limits and International Comparisons, *International Conference and School "Lasers and Applications"*, Bucarest, 1982, 577-596.
- k. BLABLA J., BALLING P., BARES J., SMYDKE J., ZIEGLER M., Frequency Intervals between Hyperfine Components of Rotational-vibrational Transition R(127), 11-5 of $^{127}\text{I}_2$ -Molecule Detected at the Wavelength of 633 nm, *CSMU Report*, 1992, **23**, 1-2.
- l. BLABLA J., Mezinárodní Overovani Jodových Kyvet V BIPM, *CSMU Report*, 1991, **19**, 1-14.
- m. BLABLA J., BALLING P., SMYDKE J., Comparison of Iodine Cells at 633 nm, *CSMU Report*, 1991, **18**, 12 p.
- n. BREZINA I., Metrological Testing of Coordinate Measuring Machines, *VDI Berichte*, 1989, 55-60.

CSIR (Afrique du Sud)

- 92-16 a. Response to the questionnaire, 1 p.

OFMET (Suisse)

- 92-17 a. Response to the questionnaire, 5 p.

DSIR (Nouvelle-Zélande)

92-18 a. Response to the questionnaire, 2 p.

- b. HURST R. B., BROWN N., DANDAWATE V. D., HANES G. R., HELMCKE J., LAYER H. P., LIU ZHONGYOU, ROWLEY W. R. C., SAKURAI T., CHUNG M. S., International Intercomparison of Iodine Stabilized Helium-neon Lasers at 633 nm Involving Ten Standards Laboratories, *Metrologia*, 1987, **24**, 39-44.

INM (France)

92-19 a. Response to the questionnaire, 19 p. + Complement, 3 p.

- b. ACEF O. *et al.*, Mesure de la fréquence absolue de la transition moléculaire de OsO₄ en coïncidence avec la raie R(26) d'un laser à CO₂ à 10,6 µm, *Rapport LPTF (Observatoire de Paris)*, avril-juin 1991, 6 p.
- c. CLAIRON A., ACEF O., CHARDONNET C., BORDÉ C. J., State of the Art for High Accuracy Frequency Standards in the 28 THz Range Using Saturated Absorption Resonances of OsO₄ and CO₂, In *Frequency Standards and Metrology*, A. de Marchi ed., Berlin: Springer-Verlag, 1989, 212-221.
- d. CLAIRON A., Mesure des fréquences laser, *Bul. BNM*, 1986, 114-119.
- e. CLAIRON A., DAHMANI B., ACEF O., GRANVEAUD M., DOMNIN YU. S., POUCHKINE S. B., TATARENKOV V. M., FELDER R., Recent Experiments Leading to the Characterization of the Performance of Portable (He-Ne) CH₄ Lasers. Part II: Results of the 1986 LPTF Absolute Frequency Measurements, *Metrologia*, 1988, **25**, 9-16.
- f. ACEF O., ZONDY J.-J., CLAIRON A., ABED M., LAURENT P., MILLERIOUX Y., Absolute Frequency Measurement of the 633 nm Line of the He-Ne/I₂ Laser, *CPEM'92 Digest*, 1992, 23-24.
- g. HIMBERT M., BOUCHAREINE P., HACHOUR A., JUNCAR P., MILLERIOUX Y., RAZET A., Measurements of Optical Wavelength Ratios Using a Compensated Field Sigmameter, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1991, **40**, 200-203.

- 92-19 h. MICHEL A., Source laser He-Ne stabilisée en fréquence sur une radiation verte ($\lambda = 543$ nm), *Congrès International de Métrologie (Mouvement français pour la qualité)*, Villeurbanne (France), sept. 1991, 358-363.
- i. RAZET A., MILLERIOUX Y., JUNCAR P., Hyperfine Structure of the 47R (9-2), 48P (11-3) and 48R (15-5) Lines of $^{127}\text{I}_2$ at 612 nm as Secondary Standards of Optical Frequency, *Metrologia*, 1991, **28**, 309-316.
- j. RAZET A., JUNCAR P., MILLERIOUX Y., Structure Hyperfine des Raies 47R (9-2), 48P (11-3) et 48R (15-5) de $^{127}\text{I}_2$ à 612 nm. Étalon Secondaire de Fréquence Optique, *Ann. Phys. (Colloque 2)*, 1991, **16**, 141-142.
- k. Voir document CCDM/92-20o.
- l. Voir document CCDM/92-20n.
- m. JUNCAR P., HIMBERT M., Reduction of the Second Order Doppler Broadening in Two-photon Atomic Beam Spectroscopy: a Proposal, *Optics Commun.*, 1992, **89**, 199-204.
- n. NEZ F., PLIMMER M. D., BOURZEIX S., JULIEN L., BIRABEN F., FELDER R., ACEF O., ZONDY J. J., LAURENT P., CLAIRON A., ABED M., MILLERIOUX Y., JUNCAR P., Precise frequency measurement of the 2S-8S/8D transitions in atomic hydrogen: New determination of the Rydberg constant, *Phys. Rev. Letters*, 1992, **69**, 2326-2329.

BIPM

- 92-20 a. Response to the questionnaire, 19 p.
- b. Voir document CCDM/92-15f.
- c. CÉREZ P., FELDER R., Gas Lens Effect and Cavity Design of Some Frequency-stabilized He-Ne Lasers, *Appl. Optics*, 1983, **22**, 1251-1256.
and authors' reply to comments, *Appl. Optics*, 1983, **22**, 3313-3314.
- d. FELDER R., He-Ne Laser Stabilized by Saturated Absorption of Methane: New Effects Leading to Frequency Shifts, *Metrologia*, 1986/87, **23**, 101-109.
- e. CHARTIER J.-M., Étude de l'influence de la valeur de la pression atmosphérique sur la fréquence de lasers asservis, *Rapport BIPM-87/2*, 1987, 19 p.

- 92-20 f. GLÄSER M., Properties of a He-Ne Laser at $\lambda = 612$ nm, Stabilized by Means of an External Iodine Absorption Cell, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1987, **IM-36**, 604-608.
- g. FELDER R., CHARTIER J.-M., DOMNIN YU. S., OBOUKOV A. S., TATARENKOV V. M., Recent Experiments Leading to the Characterization of the Performance of Portable (He-Ne)/CH₄ Lasers. Part I: Results of the 1985 International Comparison BIPM-VNIIFTRI, *Metrologia*, 1985, **25**, 1-8.
- h. Voir document CCDM/92-19e.
- i. FELDER R., ROBERTSSON L., Results of the 1988 NRC Absolute and Relative Frequency Measurements Carried out on Portable (He-Ne)/CH₄ Lasers, *Rapport BIPM-89/4*, 1989, 18 p.
- j. FREDIN-PICARD S., A Study of Contamination in ¹²⁷I₂ Cells Using Laser-induced Fluorescence, *Metrologia*, 1989, **26**, 235-244.
- k. FELDER R., CÉREZ P., Experimental Results on Gas-lens Effects in (He-Ne)/CH₄ Lasers ($\lambda = 3,39$ μ m), *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1989, **38**, 543-547.
- l. Voir document CCDM/92-13h.
- m. CHARTIER J.-M., FREDIN-PICARD S., ROBERTSSON L., Frequency-Stabilized 543 nm He-Ne Laser Systems: A New Candidate for the Realisation of the Metre?, *Optics Commun.*, 1989, **74**, 87-91.
- n. CHARTIER J.-M., MICHEL A., MILLERIOUX Y., Comparaison des étalons de fréquences à 473 THz entre le BIPM, l'INM et l'ETCA, *Bul. BNM*, 1990, 39-43.
- o. FREDIN-PICARD S., RAZET A., On the Hyperfine Structure of ¹²⁷I₂ Lines at the 543 nm Wavelength of the HeNe Laser, *Optics Commun.*, 1990, **78**, 149-152.
- p. CHARTIER J.-M., ROBERTSSON L., FREDIN-PICARD S., Recent Activities at BIPM in the Field of Stabilized Lasers — Radiations Recommended for the Definition of the Meter, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1991, **40**, 181-184.
- q. CHARTIER J.-M., ROBERTSSON L., SOMMER M., TSCHIRNICH J., NAVRATIL V., GATA R., PUCEK B., BLABLA J., SMYDKE J., ZIEGLER M., ZELENY V., PETRU F., VESELA Z., TOMANYICZKA K., BANRETI E., ZAKHARENKO YU. G., VITUSHKIN L. F., Interna-

Document
CCDM/

- 92-20 tional Comparison of Iodine-stabilized Helium-neon Lasers at $\lambda = 633$ nm Involving Seven Laboratories, *Metrologia*, 1991, **28**, 19-25.
- r. PENDRILL L. R., CHARTIER J.-M., FRENBERG M., ROBERTSSON L., Intercomparison of Optical Frequencies at 473 THz of $^{127}\text{I}_2$ -stabilized He-Ne Lasers from the Swedish National Testing and Research Institute and the Bureau International des Poids et Mesures, *Metrologia*, 1991, **28**, 95-98.
 - s. CHARTIER J.-M., HALL J. L., GLÄSER M., Identification of the I_2 Saturated Absorption Lines Excited at 543 nm with the External Beam of the Green Laser, *CPEM'86 Digest*, 1986, 323-324.
 - t. HALL J. L., FELDER R., Ma Long-Sheng, An Improved Portable I_2 -stabilized Laser Based on Modulation Transfer, *CPEM'92 Digest*, 1992, 160.
 - u. AKIMOTO Y., FELDER R., TATARENKOV V. M., DOMNIN YU. S., BUKHAROV YU. T., Dependence of Methane Pressure on a CH_4 -stabilized He-Ne Laser, *CPEM'92 Digest*, 1992, 143-144.
 - v. QUINN T. J., CHARTIER J.-M., A New Type of Iodine Cell for Stabilized Lasers, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**, 405-406.
 - w. CHARTIER J.-M., LABOT J., SASAGAWA G., NIEBAUER T., HOLLANDER W., A Portable Iodine Stabilized He-Ne Laser and its Use in an Absolute Gravimeter, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**, 420-422.
 - x. NEZ F., PLIMMER M. D., BOURZEIX S., JULIEN L., BIRABEN F., CAGNAC B., FELDER R., JUNCAR P., MILLERIOUX Y., Towards a Frequency Measurement of the Rydberg Constant Using the 2S-8S and 2S-8D Transitions of Hydrogen, *CPEM'92, IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**, 217-221.
 - y. CHARTIER J.-M., DARNEDDE H., FRENBERG M., HENNINGSSEN J., KÄRN U., PENDRILL L., Hu Jianpei, PETERSEN J. C., POULSEN O., RAMANUJAM P. S., RIELHE F., ROBERTSSON L., STÅHLBERG B., WAHLGREN H., Intercomparison of Northern European $^{127}\text{I}_2$ -stabilized He-Ne Lasers at $\lambda = 633$ nm, *Metrologia*, 1992, **29**, 331-339.
 - z. HAMON J., GIACOMO P., CARRÉ P., International Comparison of Measurements of Line Scales (1976-1984), *Metrologia*, 1987, **24**, 187-194.

Document
CCDM/

KRISS (République de Corée)

92-21 *a.* Response to the questionnaire, 5 p.

92-22 Documents Concerning the New Definition of the Metre,
Metrologia, 1984, **19**, 163-178.

ILP (Académie des sciences de la Fédération de Russie - Sibérie)

92-23 *a.* Response to the questionnaire, 4 p.

JILA (É.-U. d'Amérique)

92-24 *a.* Response to the questionnaire, 2 p.

b. MA Long-Sheng, HALL J. L., Optical Heterodyne Spectroscopy Enhanced by an External Optical Cavity: Toward Improved Working Standards, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**, 2006-2012.

ANNEXE M 2

Données utilisées pour établir la liste des radiations recommandées, 1992

Données utilisées

Cette annexe a été établie à partir du document CCDDM/92-3 en tenant compte des données nouvelles présentées à la 8^e session du CCDDM en 1992, ainsi que de la version publiée dans l'Annexe M 4 de la 7^e session du CCDDM en 1982 [1]. Les nombres entre crochets renvoient à la bibliographie commentée et aux notes, à la fin de cette annexe.

Les valeurs des fréquences (et des longueurs d'onde) des radiations de lasers peuvent être influencées par certaines conditions expérimentales telles que la pression et la pureté du milieu absorbant, la puissance transportée par le faisceau à travers ce milieu, la géométrie du faisceau, ainsi que par d'autres effets, extérieurs au laser lui-même, liés au dispositif d'asservissement. Ces influences restent compatibles avec l'incertitude indiquée (un écart-type) si l'on se place dans le domaine des conditions expérimentales correspondant à l'ensemble des données auxquelles il est fait référence ci-dessous.

1. Radiations de lasers asservis

1.1 Molécule absorbante CH_4 , transition ν_3 , P (7), composante $F_2^{(2)}$
($\lambda \approx 3,39 \mu\text{m}$)

1.1.1 Structure hyperfine résolue

Déterminations absolues de fréquence, $f_{\text{CH}_4} = 88\,376\,181\,000 \text{ kHz} + x$

Année	Laser	Chaîne de fréquence	document CCDDM/	x/kHz
1991	Inst. phys. Lebedev	PTB	92-8a	600,29
1985-1986	Inst. phys. Lebedev	VNIIFTRI	92-9a	599,9
1989-1992	Inst. phys. Lebedev	VNIIFTRI	92-9a	600,11
1989	PTB	VNIIFTRI	92-9a	600,18
1992	PTB	PTB	92-14a	600,16
1988-1991	Inst. phys. lasers (IPL), Novosibirsk	IPL	92-23a	600,44

Moyenne non pondérée $f_{\text{CH}_4} = 88\,376\,181\,600,180 \text{ kHz}$.

Les mesures dont les incertitudes étaient supérieures à 200 Hz n'ont pas été retenues pour le calcul de la moyenne. L'incertitude-type relative d'une détermination estimée à $2,9 \times 10^{-12}$ a été évaluée à l'aide de la valeur la plus éloignée de la moyenne et arrondie à 3×10^{-12} .

Valeur adoptée* :

$$\begin{aligned} f_{\text{CH}_4} &= 88\,376\,181\,600,18 \text{ kHz} \\ \text{incertitude-type} &0,27 \text{ kHz} \\ \text{incertitude-type relative} &3 \times 10^{-12}. \end{aligned}$$

d'où :

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{CH}_4} &= 3\,392\,231\,397,327 \text{ fm} \\ \text{incertitude-type} &0,010 \text{ fm} \\ \text{incertitude-type relative} &3 \times 10^{-12}. \end{aligned}$$

1.1.2 Structure hyperfine non résolue

Déterminations absolues de fréquence, $f_{\text{CH}_4} = 88\,376\,181\,000 \text{ kHz} + x$

Année	Institut	Instrument	Références	x/kHz
1983	Inst. phys. lasers** (Novosibirsk)	Instrument fixe	CCDM/92-23a et 1.1.2-1,2,3	602,9
1985	NRC (Ottawa)	Laser portable 2	CCDM/92-4a et 1.1.2-4	601,48
Valeur moyenne 1986/89/90/91	NRC (Ottawa)	Laser portable 3	CCDM/92-4a et 1.1.2-4	599,33
Valeur moyenne 1988/1990	NRLM (Tsukuba)	Laser portable 1	1.1.2-4	596,82
Valeur moyenne 1987/1989	PTB (Braunschweig)	Faisceau CH ₄	1.1.2-5,6 et 1.1.2-4	601,52
Valeur moyenne sur 7 ans	VNIIFTRI (Moscou)	Laser portable M101	CCDM/92-9a et 1.1.2-4	601,77
Valeur moyenne 1985/86/88	VNIIFTRI (Moscou)	Laser portable P1	CCDM/92-9a et 1.1.2-4	600,12
1986	VNIIFTRI (Moscou)	Laser portable PL	CCDM/92-9a	598,5
Valeur moyenne sur 7 ans	BIPM (Sèvres)	Laser portable B.3	1.1.2-4	600,96
Valeur moyenne 1988/89/91	BIPM (Sèvres)	Laser portable VB	1.1.2-4	601,33
1991	BIPM (Sèvres)	Laser portable VNIBI	CCDM/92-20a et 1.1.2-4	600,3

Moyenne non pondérée $f_{\text{CH}_4} = 88\,376\,181\,600,46 \text{ kHz}$.

* Cette valeur et les autres valeurs adoptées sont fondées sur des moyennes pondérées ou non pondérées, qui ont été arrondies pour prendre en compte l'importance des incertitudes.

** Deux autres valeurs de ce laboratoire, obtenues en 1991, ont été communiquées au BIPM à titre privé. Si l'on tient compte de ces deux valeurs additionnelles, la moyenne non pondérée ne change que de + 0,14 kHz.

Écart-type d'une détermination 1,7 kHz. Cela correspond à une incertitude-type relative de $1,92 \times 10^{-11}$, portée à $2,3 \times 10^{-11}$ par le CCDM pour correspondre à une incertitude-type de 2 kHz.

Valeur adoptée :

$$\begin{aligned} f_{\text{CH}_4} &= 88\,376\,181\,600,5 \text{ kHz} \\ \text{incertitude-type} & 2 \text{ kHz} \\ \text{incertitude-type relative} & 2,3 \times 10^{-11}. \end{aligned}$$

d'où :

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{CH}_4} &= 3\,392\,231\,397,31 \text{ fm} \\ \text{incertitude-type} & 0,08 \text{ fm} \\ \text{incertitude-type relative} & 2,3 \times 10^{-11}. \end{aligned}$$

La valeur adoptée par le CIPM en 1983 [1.1.2-7] était $f_{\text{CH}_4} = 88\,376\,181\,608 \text{ kHz}$, avec une incertitude relative globale estimée à $1,3 \times 10^{-10}$ (égale à trois fois l'incertitude-type relative).

1.2 Atome absorbant ^{40}Ca , transition $^3\text{P}_1 - ^1\text{S}_0$; $\Delta m_J = 0$ ($\lambda \approx 657 \text{ nm}$)

Les valeurs suivantes ont été obtenues pour le rapport de la fréquence f_{Ca} de cette transition à la fréquence f_i (voir section 1.4) :

$$\text{PTB} \quad 1989 \text{ [1.2-1]} \quad f_{\text{Ca}}/f_i = 0,962\,783\,953\,46 \quad (1 \pm 7 \times 10^{-11})$$

$$\text{NRLM}^{***} \quad 1991 \text{ [1.2-2]} \quad f_{\text{Ca}}/f_i = 0,962\,783\,952\,8 \quad (1 \pm 1 \times 10^{-9})$$

$$\text{Moyenne pondérée} \quad f_{\text{Ca}}/f_i = 0,962\,783\,953\,45.$$

La valeur suivante de f_{Ca} est obtenue en utilisant la valeur recommandée de $f_i = 473\,612\,214\,705 \text{ kHz}$ (section 1.4) :

$$f_{\text{Ca}} = 455\,986\,240\,477 \text{ kHz}.$$

Compte tenu de la grande différence qui existe entre les deux estimations de l'incertitude, le CCDM a jugé prudent de retenir une incertitude-type relative de $4,5 \times 10^{-10}$, comme pour les mesures comparables rapportées dans la section 1.3.

Valeur adoptée :

$$\begin{aligned} f_{\text{Ca}} &= 455\,986\,240,5 \text{ MHz} \\ \text{incertitude-type} & 0,2 \text{ MHz} \\ \text{incertitude-type relative} & 4,5 \times 10^{-10}. \end{aligned}$$

d'où :

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{Ca}} &= 657\,459\,439,3 \text{ fm} \\ \text{incertitude-type} & 0,3 \text{ fm} \\ \text{incertitude-type relative} & 4,5 \times 10^{-10}. \end{aligned}$$

*** Une valeur obtenue à partir de mesures ultérieures confirme celle obtenue à la PTB, compte tenu d'une incertitude relative de 2×10^{-10} .

1.3 *Molécule absorbante* $^{127}\text{I}_2$, transition 8-5, P(10), composante a_9 (ou g) ($\lambda \approx 640$ nm)

Les valeurs suivantes ont été obtenues pour la fréquence f_{a_9} de cette transition :

NPL	1984 [1.3-1]	$f_{a_9} = 468\,218\,332\,412$	$(1 \pm 1,0 \times 10^{-10})$	kHz
NIM-CSMU-PTB	1985 [1.3-2]	$f_{a_9} = 468\,218\,332\,303$	$(1 \pm 1,2 \times 10^{-10})$	kHz
IMGC-BIPM	1985 [1.3-3]	$f_{a_9} = 468\,218\,332\,062$	$(1 \pm 4,6 \times 10^{-10})$	kHz
Moyenne pondérée		$f_{a_9} = 468\,218\,332\,358$		kHz.

Compte tenu du nombre restreint de déterminations, le CCDM a jugé prudent de retenir une incertitude-type relative de $4,5 \times 10^{-10}$.

Valeur adoptée :

$$\begin{aligned} f_{a_9} &= 468\,218\,332,4 \text{ MHz} \\ \text{incertitude-type} & 0,2 \text{ MHz} \\ \text{incertitude-type relative} & 4,5 \times 10^{-10}. \end{aligned}$$

d'où :

$$\begin{aligned} \lambda_{a_9} &= 640\,283\,468,7 \text{ fm} \\ \text{incertitude-type} & 0,3 \text{ fm} \\ \text{incertitude-type relative} & 4,5 \times 10^{-10}. \end{aligned}$$

1.4 *Molécule absorbante* $^{127}\text{I}_2$, transition 11-5, R(127), composante a_{13} (ou i) ($\lambda \approx 633$ nm)

La valeur de la fréquence ou de la longueur d'onde recommandée est fondée sur une mesure de fréquence effectuée au LPTF [document CCDM/92-19a] en utilisant un laser de l'INM asservi sur la composante f.

LPTF/ETCA/INM 1992 [1.4-1] $f_i = 473\,612\,214\,705,4$ ($1 \pm 2,5 \times 10^{-11}$) kHz.

Valeur adoptée :

$$\begin{aligned} f_i &= 473\,612\,214\,705 \text{ kHz} \\ \text{incertitude-type} & 12 \text{ kHz} \\ \text{incertitude-type relative} & 2,5 \times 10^{-11}. \end{aligned}$$

d'où :

$$\begin{aligned} \lambda_i &= 632\,991\,398,22 \text{ fm} \\ \text{incertitude-type} & 0,02 \text{ fm} \\ \text{incertitude-type relative} & 2,5 \times 10^{-11}. \end{aligned}$$

Dans les applications pour lesquelles on peut accepter des tolérances plus grandes, donc aussi un domaine d'incertitude plus grand, les coefficients donnés dans la bibliographie commentée [1.4-1] conduisent à une incertitude-type d'environ 50 kHz (ou une incertitude-type relative de 1×10^{-10}) pour un laser qui fonctionne dans les conditions recommandées en 1983 [1.1.2-7].

En 1983, la valeur adoptée par le CIPM était $f_i = 473\,612\,214,8$ MHz, avec une incertitude relative globale estimée de 1×10^{-9} (égale à trois fois l'incertitude-type relative).

1.5 *Molécule absorbante* $^{127}\text{I}_2$, *transition* 9-2, R(47), *composante* a_7 (ou o) ($\lambda \approx 612$ nm)

Les valeurs suivantes ont été obtenues pour la fréquence f_{a_7} de cette transition :

NPL	1982 [1.5-1]	$f_{a_7} = 489\,880\,354\,972$ ($1 \pm 1 \times 10^{-10}$) kHz
BIPM	1982 [1.5-1]	$f_{a_7} = 489\,880\,354\,721$ ($1 \pm 2,1 \times 10^{-10}$) kHz
PTB/BIPM	1986 [1.5-2]	$f_{a_7} = 489\,880\,355\,019$ ($1 \pm 8,4 \times 10^{-11}$) kHz
VNIIM	1989 [1.5-3]	$f_{a_7} = 489\,880\,355\,055$ ($1 \pm 3,0 \times 10^{-10}$) kHz
INM	1991 [1.5-4]	$f_{a_7} = 489\,880\,354\,841$ ($1 \pm 8,4 \times 10^{-11}$) kHz

Moyenne non pondérée $f_{a_7} = 489\,880\,354\,922$ kHz.

D'autres valeurs disponibles ayant des incertitudes-types relatives supérieures à 3×10^{-10} n'ont pas été prises en compte. L'écart-type relatif calculé à partir de la dispersion de ces cinq valeurs est de $2,8 \times 10^{-10}$. Cette valeur est arrondie à 3×10^{-10} pour donner l'incertitude-type relative.

Valeur adoptée :

$$\begin{aligned} f_{a_7} &= 489\,880\,354,9 \text{ MHz} \\ \text{incertitude-type} & 0,15 \text{ MHz} \\ \text{incertitude-type relative} & 3 \times 10^{-10}. \end{aligned}$$

d'où :

$$\begin{aligned} \lambda_{a_7} &= 611\,970\,770,0 \text{ fm} \\ \text{incertitude-type} & 0,18 \text{ fm} \\ \text{incertitude-type relative} & 3 \times 10^{-10}. \end{aligned}$$

En 1983, la valeur adoptée par le CIPM était $f_{a_7} = 489\,880\,355,1$ MHz, avec une incertitude relative globale estimée à $1,1 \times 10^{-9}$ (égale à trois fois l'incertitude-type relative).

1.6 *Molécule absorbante* $^{127}\text{I}_2$, *transition* 17-1, P(62), *composante* a_1 (ou o) ($\lambda \approx 576$ nm)

Les valeurs suivantes ont été obtenues pour la fréquence f_{a_1} de cette transition :

NBS	1982 [1.6-1]	$f_{a_1} = 520\,206\,808\,491$ ($1 \pm 1,5 \times 10^{-10}$) kHz
NPL	1984 [1.6-2]	$f_{a_1} = 520\,206\,808\,272$ ($1 \pm 1 \times 10^{-10}$) kHz

Moyenne non pondérée $f_{a_1} = 520\,206\,808\,382$ kHz.

Cette moyenne n'étant fondée que sur deux déterminations, le CCDM a jugé prudent de retenir une incertitude-type relative estimée à 4×10^{-10} , très proche de la différence entre ces deux valeurs.

Valeur adoptée :

$$\begin{aligned} f_{a_1} &= 520\,206\,808,4 \text{ MHz} \\ \text{incertitude-type} & 0,2 \text{ MHz} \\ \text{incertitude-type relative} & 4 \times 10^{-10}. \end{aligned}$$

d'où :

$$\begin{aligned} \lambda_{a_1} &= 576\,294\,760,4 \text{ fm} \\ \text{incertitude-type} & 0,2 \text{ fm} \\ \text{incertitude-type relative} & 4 \times 10^{-10}. \end{aligned}$$

En 1983, la valeur adoptée par le CIPM était $f_{a_1} = 520\,206\,808,51 \text{ MHz}$, avec une incertitude globale relative estimée à 6×10^{-10} (égale à trois fois l'incertitude-type relative).

1.7 *Molécule absorbante* $^{127}\text{I}_2$, *transition* 26-0, R(12), *composante* a_9 ($\lambda \approx 543,5 \text{ nm}$)

Les valeurs suivantes ont été obtenues pour la fréquence f_{a_9} de cette transition :

$$\begin{aligned} \text{PTB 1991 [1.7-1]} & f_{a_9} = 551\,579\,483\,029 (1 \pm 8,4 \times 10^{-11}) \text{ kHz} \\ \text{NPL 1992 [1.7-2]} & f_{a_9} = 551\,579\,482\,900 (1 \pm 13 \times 10^{-11}) \text{ kHz} \end{aligned}$$

$$\text{Moyenne non pondérée } f_{a_9} = 551\,579\,482\,964 \text{ kHz}.$$

Cette moyenne n'étant fondée que sur deux déterminations, liées par la même fréquence de référence, le CCDDM a jugé prudent de retenir une incertitude-type relative estimée à $2,5 \times 10^{-10}$, très proche de la différence entre ces deux valeurs.

Valeur adoptée :

$$\begin{aligned} f_{a_9} &= 551\,579\,482,96 \text{ MHz} \\ \text{incertitude-type} & 0,14 \text{ MHz} \\ \text{incertitude-type relative} & 2,5 \times 10^{-10}. \end{aligned}$$

d'où :

$$\begin{aligned} \lambda_{a_9} &= 543\,516\,333,1 \text{ fm} \\ \text{incertitude-type} & 0,14 \text{ fm} \\ \text{incertitude-type relative} & 2,5 \times 10^{-10}. \end{aligned}$$

1.8 *Molécule absorbante* $^{127}\text{I}_2$, transition 43-0, P(13), composante a_3
(ou s) ($\lambda \approx 515$ nm)

Les valeurs suivantes ont été obtenues pour le rapport de la fréquence f_{a_3} de cette transition à la fréquence f_i (section 1.4) :

NPL	1982	[1.8-1]	$f_{a_3}/f_i = 1,229\,889\,316\,88 (1 \pm 1 \times 10^{-10})$
BIPM	1982	[1.8-1]	$f_{a_3}/f_i = 1,229\,889\,316\,88 (1 \pm 2,5 \times 10^{-10})$
PTB	1989	[1.8-2]	$f_{a_3}/f_i = 1,229\,889\,317\,33 (1 \pm 7 \times 10^{-11})$
PTB	1985	[1.8-3]	$f_{a_3}/f_i = 1,229\,889\,317\,44 (1 \pm 7 \times 10^{-11})$
PTB	1986	[1.8-4]	$f_{a_3}/f_i = 1,229\,889\,317\,36 (1 \pm 8 \times 10^{-11})$
PTB	1991	[1.8-5]	$f_{a_3}/f_i = 1,229\,889\,317\,45 (1 \pm 8 \times 10^{-11})$

Moyenne non pondérée $f_{a_3}/f_i = 1,229\,889\,317\,22$.

D'autres valeurs disponibles ayant des incertitudes relatives supérieures à $2,5 \times 10^{-10}$ n'ont pas été prises en compte.

Avec la valeur recommandée $f_i = 473\,612\,214\,705$ kHz (section 1.4), on obtient la valeur suivante de f_{a_3} :

$$f_{a_3} = 582\,490\,603\,371 \text{ kHz.}$$

L'incertitude-type relative calculée à partir de la dispersion des six valeurs est de $2,2 \times 10^{-10}$, que le CCDM a préféré arrondir à $2,5 \times 10^{-10}$.

Valeur adoptée :

$$\begin{aligned} f_{a_3} &= 582\,490\,603,37 \text{ MHz} \\ \text{incertitude-type} &0,15 \text{ MHz} \\ \text{incertitude-type relative} &2,5 \times 10^{-10}. \end{aligned}$$

d'où :

$$\begin{aligned} \lambda_{a_3} &= 514\,673\,466,4 \text{ fm} \\ \text{incertitude-type} &0,13 \text{ fm} \\ \text{incertitude-type relative} &2,5 \times 10^{-10}. \end{aligned}$$

En 1983, la valeur adoptée par le CIPM était $f_{a_3} = 582\,490\,603,6$ MHz avec une incertitude relative globale estimée à $1,3 \times 10^{-9}$ (égale à trois fois l'incertitude-type relative).

2. Radiations de lampes spectrales

2.1 *Radiation correspondant à la transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ de l'atome de ^{86}Kr ($\lambda \approx 606$ nm)*

La valeur suivante a été obtenue à partir de $(\lambda_i)_{\text{Kr}} \times (1/\lambda_{\text{Kr}})$:

$$[2.1-1] \quad f_{\text{Kr}}/f_i = 1,044\,919\,242\,05.$$

Compte tenu de la valeur recommandée $f_i = 473\,612\,214\,705$ kHz (section 1.4) et de l'incertitude-type relative estimée en [2.1-1] à $1,3 \times 10^{-9}$, on obtient la valeur suivante de f_{Kr} :

$$f_{\text{Kr}} = 494\,886\,516\,415 \text{ kHz.}$$

Valeur adoptée :

$$\begin{aligned} f_{\text{Kr}} &= 494\,886\,516,4 \text{ MHz} \\ \text{incertitude-type} & 0,6 \text{ MHz} \\ \text{incertitude-type relative} & 1,3 \times 10^{-9}. \end{aligned}$$

d'où :

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{Kr}} &= 605\,780\,210,3 \text{ fm} \\ \text{incertitude-type} & 0,8 \text{ fm} \\ \text{incertitude-type relative} & 1,3 \times 10^{-9}. \end{aligned}$$

En 1983, la valeur adoptée par le CIPM était $\lambda_{\text{Kr}} = 605\,780\,210 \text{ fm}$ avec une incertitude relative globale estimée à 4×10^{-9} (égale à trois fois l'incertitude-type relative).

Bibliographie commentée

1. *BIPM Com. cons. déf. mètre*, 1982, **7**, M53-M64.
- 1.1.2-1 ZAKHARYASH V. F., KLEMENTYEV V. M., NIKITIN M. V., TIMCHENKO B. A., CHEBOTAYEV V. P., Absolute Measurement of the Frequency of the E-line of Methane, *Sov. Phys. Tech. Phys.*, 1983, **23**, 11, 1374-1375.
- 1.1.2-2 CHEBOTAYEV V. P., KLEMENTYEV V. M., NIKITIN M. V., TIMCHENKO B. A., ZAKHARYASH V. F., Comparison of Frequency Stabilities of the Rb Standard and of the He-Ne/CH₄ Laser Stabilized to the E Line in Methane, *Appl. Phys.*, 1985, **B36**, 59-61.
- 1.1.2-3 BAGAYEV S. N., BORISOV B. D., GOL'DORT V. G., GUSEV A. Yu. *et al*, An Optical Standard of Time, *Avtometrya*, 1983, **3**, 37-58.
- 1.1.2-4 FELDER R., A Decade of Work on the Determination of the Frequency of the F₂² Methane Transition at $\lambda = 3,39 \text{ }\mu\text{m}$, *Rapport BIPM-92/8*.
- 1.1.2-5 WEISS C. O., KRAMER G., LIPPHARDT B., GARCIA E., Frequency Measurement of a CH₄ Hyperfine Line at 88 THz /"Optical Clock", *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **24**, 10, 1970-1972.
- 1.1.2-6 FELDER R., ROBERTSSON L., Report on the 1989 PTB Experiment, *Rapport BIPM-92/7*.
- 1.1.2-7 *BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1983, **51**, 25-28 et Documents Concerning the New Definition of the Metre, *Metrologia*, 1984, **19**, 165-166.
- 1.2-1 BÖNSCH G., NICOLAUS A., BRAND U., Wellenlängenbestimmung der Ca-Interkombinationslinie mit dem Michelson-Interferometer der PTB, *PTB Mitteilungen*, 1989, **99**, 329-334 [document CCDDM/92-14i].

Cette publication donne

$$\lambda_{\text{Ca}}/\lambda_{\text{i}} = 1,038\,654\,618\,63 \text{ } (1 \pm 7 \times 10^{-11}).$$

Elle permet de calculer :

$$f_{\text{Ca}}/f_i = 0,962\,783\,953\,46 \quad (1 \pm 7 \times 10^{-11}).$$

- 1.2-2 ITO N., ISHIKAWA J., MORINAGA A., Frequency Locking a Dye Laser to the Central Optical Ramsey Fringe in a Ca Atomic Beam and Wavelength Measurement, *J. Opt. Soc. Am.*, 1991, **B8**, 1388-1390 [document CCDDM/92-13d].

Cette publication donne :

$$\lambda_{\text{Ca}} = 657,459\,439\,6 \quad (1 \pm 1 \times 10^{-9}) \text{ nm.}$$

Avec la valeur adoptée par le CIPM en 1983 [1] :

$$f_i = 473\,612\,214,8 \quad (1 \pm 3,4 \times 10^{-10}) \text{ MHz,}$$

on calcule :

$$f_{\text{Ca}}/f_i = 0,962\,783\,952\,8 \quad (1 \pm 1 \times 10^{-9}).$$

- 1.3-1 BENNETT S. J., MILLS-BAKER P., Iodine Stabilized 640 nm Helium-neon Laser, *Opt. Commun.*, 1984, **51**, 322-324 [document CCDDM/92-12d].

Cette publication permet de calculer le rapport f_g/f_i [document CCDDM/92-12a]. La valeur est :

$$f_g/f_i = 0,988\,611\,184\,191 \quad (1 \pm 1 \times 10^{-10}) \quad (1 \text{ écart-type}).$$

Avec la valeur recommandée de $f_i = 473\,612\,214\,705 \quad (1 \pm 2,5 \times 10^{-11}) \text{ kHz}$ (section 1.4), on calcule $f_g = 468\,218\,332\,427 \quad (1 \pm 1,03 \times 10^{-10}) \text{ kHz}$ à une pression de l'iode de 16 Pa (ou à une température du point froid de 14,3 °C) et une amplitude de modulation de fréquence de 7 MHz. Pour ramener cette valeur à la température de référence de 16 °C et à l'amplitude de modulation de 6 MHz, de crête à creux, il convient de lui appliquer des corrections de - 23 kHz et de + 8 kHz, en admettant un coefficient de décalage de la fréquence en fonction de la pression de - 7,8 kHz/Pa et en fonction de la modulation de - 7,6 kHz/MHz, égal à celui décrit en [1.3-2], ce qui donne :

$$f_{\text{ag}} = 468\,218\,332\,412 \quad (1 \pm 1,0 \times 10^{-10}) \text{ kHz.}$$

- 1.3-2 ZHAO K. G., BLABLA J., HELMCKE J., $^{127}\text{I}_2$ -stabilized ^3He - ^{22}Ne Laser at 640 nm Wavelength, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1985, **IM-34**, 252-256 [document CCDDM/92-10.2c].

Cette publication donne :

$$\lambda_{\text{ag}} = 640,283\,468\,8 \quad (1 \pm 1,1 \times 10^{-9}) \text{ nm} \quad (3 \text{ écarts-types}).$$

BÖNSCH G., Simultaneous Wavelength Comparison of Iodine-stabilized Lasers at 515 nm, 633 nm and 640 nm, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1985, **IM-34**, 248-251.

Cette publication donne :

$$\lambda_i/\lambda_{\text{ag}} = 0,988\,611\,183\,86 \quad (1 \pm 12 \times 10^{-11}) \quad (1 \text{ écart-type})$$

[document CCDDM/92-14a].

Avec la valeur recommandée de $f_i = 473\,612\,214\,705 \quad (1 \pm 2,5 \times 10^{-11}) \text{ kHz}$ (section 1.4), on calcule $f_{\text{ag}} = 468\,218\,332\,270 \quad (1 \pm 1,23 \times 10^{-10}) \text{ kHz}$ pour un

point froid à la température de 18 °C (pression de l'iode = 22,6 Pa). Pour ramener cette valeur à la température de référence de 16 °C (pression de l'iode = 18,9 Pa) il convient de lui appliquer une correction de + 29 kHz (avec un coefficient de - 7,8 kHz/Pa). Il faut appliquer une correction supplémentaire de + 4 kHz pour tenir compte de l'amplitude de modulation de 6,5 MHz, de crête à creux, et d'un coefficient de modulation de - 7,6 kHz/MHz, ce qui donne :

$$f_{a_9} = 468\,218\,332\,303 \text{ } (1 \pm 1,2 \times 10^{-10}) \text{ kHz.}$$

1.3-3 Document CCDM/92-6a et document CCDM/92-20a.

Ces documents donnent :

$\lambda_{a_9} (17 \text{ °C})/\lambda_{a_{17}} (20 \text{ °C}) = 1,011\,520\,341\,04 \text{ } (1 \pm 4,6 \times 10^{-10})$.
Avec la valeur recommandée de $f_i = 473\,612\,214\,705 \text{ } (1 \pm 2,5 \times 10^{-11}) \text{ kHz}$ (section 1.4) on calcule $f_{a_9} = 468\,218\,332\,048 \text{ } (1 \pm 4,6 \times 10^{-10}) \text{ kHz}$ pour un point froid à la température de 17 °C (pression de l'iode = 20,7 Pa). Il convient d'appliquer à cette valeur une correction de + 14 kHz, pour la ramener à la température de référence de 16 °C (pression de l'iode = 18,9 Pa), ce qui conduit à :

$$f_{a_9} = 468\,218\,332\,062 \text{ } (1 \pm 4,6 \times 10^{-10}) \text{ kHz.}$$

1.4-1 ACEF O., ZONDY J. J., ABED M., ROVERA D. G., GÉRARD A. H., CLAIRON A., LAURENT Ph., MILLERIOUX Y., JUNCAR P., A CO₂ to Visible Optical Frequency Synthesis Chain: Accurate Measurement of the 473 THz He-Ne/I₂ Laser, *Opt. Commun.*, 1993, **97**, 29-34 et document CCDM/92-19a.

Ces publications donnent :

$$f_f \text{ (INM)} = (473\,612\,353\,586 \pm 3,4) \text{ kHz.}$$

En utilisant la différence de fréquence $f_f - f_i = (138\,892 \pm 5) \text{ kHz}$ entre les composantes f et i [Annexe M 3, tableau 12], on obtient la fréquence de la composante i du laser de l'INM $f_i \text{ (INM)} = 473\,612\,214\,694,0 \text{ kHz}$.

Document CCDM/92-20a.

Ce document donne :

$$f_{\text{INM}12} - f_{\text{BIPM}4} = - (11,4 \pm 1,5) \text{ kHz.}$$

CHARTIER J.-M., ROBERTSSON L., FREDIN-PICARD S., Recent Activities at BIPM in the Field of Stabilized Lasers — Radiations Recommended for the Definition of the Meter, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1991, **40**, 181-184 [document CCDM/92-20p].

CHARTIER J.-M., ROBERTSSON L., SOMMER M. *et al.*, International Comparison of Iodine-stabilized Helium-neon Lasers at $\lambda = 633 \text{ nm}$ Involving Seven Laboratories, *Metrologia*, 1991, **28**, 19-25 [document CCDM/92-20q].

CHARTIER J.-M., DARNEDDE H., FRENNEBERG M. *et al.*, Intercomparison of Northern European ¹²⁷I₂-stabilized He-Ne Lasers

at $\lambda = 633$ nm, *Metrologia*, 1992, **29**, 331-339. [document CCDM/92-20y].

Ces documents montrent que la fréquence du laser BIPM4 est très proche de la moyenne. Il a été convenu que le CCDM adoptera une valeur internationale proche de cette moyenne.

En appliquant la différence de fréquence correspondante (document CCDM/92-20a) f_i (BIPM) – f_i (INM) = 11,4 kHz, on obtient la valeur $f_i = 473\,612\,214\,705,4$ kHz.

L'incertitude-type a été dérivée de l'incertitude de la chaîne de fréquence et des incertitudes résultant des variations des paramètres suivants :

Cuve à iode	
température des parois de la cuve (25 ± 5) °C [coefficient 0,5 kHz/°C]	2,5 kHz
point froid à la température de ($15 \pm 0,2$)°C [coefficient – 15 kHz/°C]	3,0 kHz
incertitude relative à la pureté de l'iode	5,0 kHz
Modulation de fréquence, crête à creux, ($6 \pm 0,3$) MHz [coefficient – 10 kHz/MHz]	3,0 kHz
Puissance transportée par le faisceau dans un seul sens, (10 ± 5) mW [pour une valeur absolue du coefficient $\leq 1,4$ kHz/mW]	7,0 kHz
Incrtitude de l'intervalle $f_i - f_i$	5,0 kHz
Incrtitude de la différence de fréquence $f_{\text{INM}} - f_{\text{BIPM}}$	1,5 kHz
Incrtitude de la mesure de fréquence LPTF/ETCA/INM	3,4 kHz
Incrtitude-type combinée	11,7 kHz
Incrtitude-type relative	$2,5 \times 10^{-11}$

1.5-1 *BIPM Com. cons. déf. mètre*, 1982, **7**, M57 et Documents Concerning the New Definition of the Metre, *Metrologia*, 1984, **19**, 167.

Ces publications donnent :

NPL 1982 [12] $f_o/f_i = 1,034\,349\,072\,43$ ($1 \pm 1 \times 10^{-10}$)

BIPM 1982 [24] $f_o/f_i = 1,034\,349\,071\,90$ ($1 \pm 2,1 \times 10^{-10}$).

Les mesures dont les incertitudes relatives étaient supérieures à 3×10^{-10} n'ont pas été prises en compte.

À partir des valeurs de ces rapports et de la valeur recommandée de $f_i = 473\,612\,214\,705$ ($1 \pm 2,5 \times 10^{-11}$) kHz (section 1.4), on

calcule :

NPL 1982 f_o ou $f_{a_7} = 489\,880\,354\,972 (1 \pm 1 \times 10^{-10})$ kHz

BIPM 1982 f_o ou $f_{a_7} = 489\,880\,354\,721 (1 \pm 2,1 \times 10^{-10})$ kHz.

- 1.5-2 BÖNSCH G., GLÄSER M., SPIEWECK F., Bestimmung der Wellenlängenverhältnisse von drei $^{127}\text{I}_2$ -stabilisierten Lasern bei 515 nm, 612 nm und 633 nm, *PTB Jahresbericht*, 1986, 161 [document CCDM/92-14n] et document CCDM/92-14a.

Ces publications donnent :

$$\lambda_{b_{15}}/\lambda_i = 0,966\,791\,921\,43 (1 \pm 8 \times 10^{-11}).$$

Avec la valeur recommandée de $f_i = 473\,612\,214\,705 (1 \pm 2,5 \times 10^{-11})$ kHz (section 1.4), on calcule :

$$f_{b_{15}} = 489\,880\,194\,701 (1 \pm 8,4 \times 10^{-11}) \text{ kHz},$$

et avec la différence de fréquence $f_{b_{15}} - f_{a_7} = (-160\,318 \pm 3)$ kHz [Annexe M 3, tableau 8], on calcule :

$$f_{a_7} = 489\,880\,355\,019 (1 \pm 8,4 \times 10^{-11}) \text{ kHz}.$$

- 1.5-3 VITUSHKIN L. F., ZAKHARENKO Yu. G., YVANOV I. V., LEIBENGARDT G. I., SHUR V. L., Measurements of Wavelength of High-stabilized He-Ne/I₂ Laser at 612 nm, *Opt. Spekt.*, 1990, **68**, 705-707.

Cette publication donne :

$$\lambda_d/\lambda_o = 1,034\,348\,712 (1 \pm 3 \times 10^{-10}).$$

Avec la valeur recommandée de $f_i = 473\,612\,214\,705 (1 \pm 2,5 \times 10^{-11})$ kHz (section 1.4) et la valeur de la différence de fréquence $f_d - f_i = (165\,116 \pm 5)$ kHz entre les composantes d et i [Annexe M 3, tableau 12], on calcule :

$$f_d = 473\,612\,379\,821 (1 \pm 2,7 \times 10^{-11}) \text{ kHz et}$$

$$f_o \text{ ou } f_{a_7} = 489\,880\,355\,055 (1 \pm 3,0 \times 10^{-10}) \text{ kHz}.$$

- 1.5-4 HIMBERT M., BOUCHAREINE P., HACHOUR A., JUNCAR P., MILLERIOUX Y., RAZET A., Measurements of Optical Wavelength Ratios Using a Compensated Field Sigmameter, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1991, **40**, 200-203 [document CCDM/92-19g] et document CCDM/92-19a.

Ces documents donnent :

$$f_i \text{ ou } f_{a_{13}} = (489\,880\,604\,541 \pm 88) \text{ kHz}.$$

En utilisant la valeur adoptée par le CIPM en 1983 [1] de $f_i = 473\,612\,214,8$ MHz et la valeur de la différence de fréquence $f_e - f_i = (152\,255 \pm 5)$ kHz [Annexe M 3, tableau 12], on remonte à :

$$f_e = 473\,612\,367\,055 \text{ kHz et}$$

$$f_{a_{13}}/f_e = 1,034\,349\,267.$$

Avec la valeur recommandée de $f_i = 473\,612\,214\,705 (1 \pm 2,5 \times 10^{-11})$ kHz (section 1.4) et la valeur de la différence de fréquence $f_e - f_i$, on calcule :

$$f_e = 473\,612\,366\,960 \text{ kHz et}$$

$$f_{a_{13}} = 489\,880\,604\,443 \text{ kHz}.$$

Compte tenu de l'incertitude sur le rapport $f_{a_{13}}/f_c$ de $\pm 8 \times 10^{-11}$ donnée dans le document CCDDM/92-19g, on obtient :

$$f_{a_{13}} = 489\,880\,604\,443 \text{ (} 1 \pm 8,4 \times 10^{-11} \text{) kHz.}$$

La différence de fréquence $f_{a_7} - f_{a_{13}} = (-249\,602 \pm 10) \text{ kHz}$ entre les composantes a_7 et a_{13} [Annexe M 3, tableau 7] permet de calculer :

$$f_{a_7} = 489\,880\,354\,841 \text{ (} 1 \pm 8,4 \times 10^{-11} \text{) kHz.}$$

- 1.6-1 Mesures de fréquence du NBS dans le visible et le proche infrarouge [document CCDDM/82-30].

Ce document donne la valeur 520 206 808 547 $(1 \pm 1,5 \times 10^{-10}) \text{ kHz}$, réduite de 12 kHz à la demande du délégué à la 7^e session du CCDDM. Cette valeur doit maintenant être aussi multipliée par le rapport $(88\,376\,181\,600,5/88\,376\,181\,608)$ pour tenir compte de la redétermination de la fréquence du méthane en 1992 (section 1.1.2), soit :

$$f_{a_1} = 520\,206\,808\,491 \text{ (} 1 \pm 1,5 \times 10^{-10} \text{) kHz.}$$

- 1.6-2 BARWOOD G. P., ROWLEY W. R. C., Characteristics of a $^{127}\text{I}_2$ -Stabilized Dye Laser at 576 nm, *Metrologia*, 1984, **20**, 19-23 [document CCDDM/92-12c].

Cette publication remplace le document CCDDM/82-34.

Elle donne :

$$f_{a_1}/f_{a_{13}} = 1,098\,381\,317\,29 \text{ (} 1 \pm 1 \times 10^{-10} \text{).}$$

À partir de la valeur recommandée de $f_{a_{13}} = 473\,612\,214\,705 \text{ (} 1 \pm 2,5 \times 10^{-11} \text{) kHz}$ (section 1.4) on calcule $f_{a_1} = 520\,206\,808\,272 \text{ (} 1 \pm 1 \times 10^{-10} \text{) kHz.}$

- 1.7-1 Documents CCDDM/92-14a, CCDDM/92-14j et BRAND U., Ein iodstabilisiertes He-Ne Laser-Wellenlängennormal grüner Strahlung, *PTB Bericht*, 1991, **Opt. 34**, 1-109 [document CCDDM/92-14j].

Ces documents donnent :

$$\lambda_{a_9}/\lambda_i = 0,858\,647\,265\,30 \text{ (} 1 \pm 8 \times 10^{-11} \text{) (1 écart-type).}$$

Avec la valeur recommandée de $f_i = 473\,612\,214\,705 \text{ (} 1 \pm 2,5 \times 10^{-11} \text{) kHz}$ (section 1.4) on calcule :

$f_{a_9} = 551\,579\,483\,037 \text{ (} 1 \pm 8,4 \times 10^{-11} \text{) kHz}$ avec un point froid à la température de -10 °C (pression de l'iode = 1,4 Pa). Pour ramener cette valeur à la température de référence de 0 °C (pression de l'iode = 4,1 Pa), il convient de lui appliquer une correction de -8 kHz , en utilisant le coefficient de pression de $-3,0 \text{ kHz/Pa}$ (document CCDDM/92-14j, 44), ce qui donne :

$$f_{a_9} = 551\,579\,483\,029 \text{ (} 1 \pm 8,4 \times 10^{-11} \text{) kHz.}$$

- 1.7-2 Document CCDDM/92-12a.

Ce document donne :

$$f_{b_{10}}(0 \text{ °C})/f_i = 1,164\,624\,021\,92 \text{ (} 1 \pm 12 \times 10^{-11} \text{).}$$

Avec la valeur recommandée de $f_i = 473\,612\,214\,705$ ($1 \pm 2,5 \times 10^{-11}$) kHz (section 1.4) on calcule :

$f_{b_{10}} = 551\,580\,162\,320$ ($1 \pm 12,3 \times 10^{-11}$) kHz, le point froid étant à la température de 0°C (pression de l'iode = 4,1 Pa). En utilisant la valeur mesurée de $f_{b_{10}} - f_{a_9} = (679\,420 \pm 15)$ kHz (incertitude-type) [Annexe M 3, tableau 5], on calcule :

$$f_{a_9} = 551\,579\,482\,900 \text{ (} 1 \pm 13 \times 10^{-11} \text{) kHz.}$$

- 1.8-1 *BIPM Com. cons. déf. mètre*, 1982, **7**, M57 et Documents Concerning the New Definition of the Metre, *Metrologia*, 1984, **19**, 168.

Ces publications donnent :

$$\text{NPL 1982 [12]} \quad f_{a_3}/f_i = 1,229\,889\,316\,88 \text{ (} 1 \pm 1 \times 10^{-10} \text{)}$$

$$\text{BIPM 1982 [27]} \quad f_{a_3}/f_i = 1,229\,889\,316\,88 \text{ (} 1 \pm 2,5 \times 10^{-10} \text{)}.$$

Les mesures dont les incertitudes relatives étaient supérieures à $2,5 \times 10^{-10}$ n'ont pas été prises en compte.

- 1.8-2 BÖNSCH G., NICOLAUS A., BRAND U., Wellenlängenbestimmung der Ca-Interkombinationslinie mit dem Michelson-Interferometer der PTB, *PTB Mitteilungen*, 1989, **99**, 329-334 [document CCDDM/92-14i].

Cette publication donne :

$$f_i/f_{a_3} = 0,813\,081\,295\,94 \text{ (} 1 \pm 7 \times 10^{-11} \text{)};$$

on en déduit :

$$f_{a_3}/f_i = 1,229\,889\,317\,33 \text{ (} 1 \pm 7 \times 10^{-11} \text{)}.$$

- 1.8-3 BÖNSCH G., Simultaneous Wavelength Comparison of Iodine-stabilized Lasers at 515 nm, 633 nm and 640 nm, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1985, **IM-34**, 248-251.

Cette publication donne :

$$f_i/f_{a_3} = 0,813\,081\,295\,87 \text{ (} 1 \pm 7 \times 10^{-11} \text{)};$$

on en déduit :

$$f_{a_3}/f_i = 1,229\,889\,317\,44 \text{ (} 1 \pm 7 \times 10^{-11} \text{)}.$$

- 1.8-4 BÖNSCH G., GLÄSER M., SPIEWECK F., Bestimmung der Wellenlängenverhältnisse von drei $^{127}\text{I}_2$ -stabilisierten Lasern bei 515 nm, 612 nm und 633 nm, *PTB Jahresbericht*, 1986, 161 [document CCDDM/92-14n].

Cette publication donne :

$$f_i/f_{a_3} = 0,813\,081\,295\,92 \text{ (} 1 \pm 8 \times 10^{-11} \text{)};$$

on en déduit :

$$f_{a_3}/f_i = 1,229\,889\,317\,36 \text{ (} 1 \pm 8 \times 10^{-11} \text{)}.$$

- 1.8-5 BÖNSCH G., NICOLAUS A., BRAND U., Wellenlängenbestimmung für den I_2 -stabilisierten He-Ne-Laser bei 544 nm, *PTB Jahresbericht*, 1991, 173-174 [document CCDDM/92-14l].

Cette publication donne :

$$f_i/f_{a_3} = 0,813\,081\,295\,86 \text{ (} 1 \pm 8 \times 10^{-11} \text{)};$$

on en déduit :

$$f_{a_3}/f_i = 1,229\,889\,317\,45 \text{ (} 1 \pm 8 \times 10^{-11} \text{)}.$$

2.1-1 *BIPM Com. cons. déf. mètre*, 1982, **7**, M 58 et Documents Concerning the New Definition of the Metre, *Metrologia*, 1984, **19**, 168.

$$f_{\text{Kr}}/f_{\text{i}} = 1,044\,919\,242\,05\,(1 \pm 1,3 \times 10^{-9}).$$

ANNEXE M 3

Intervalles de fréquence entre composantes hyperfines de raies d'absorption de l'iode

Ces tableaux remplacent ceux publiés dans *BIPM Com. cons. déf. mètre*, 1982, **7**, M65-M75 et dans *Metrologia*, 1984, **19**, 170-178.

La notation adoptée pour les composantes hyperfines est celle utilisée dans la bibliographie.

Les valeurs adoptées pour les intervalles de fréquence sont des moyennes pondérées des valeurs données dans la bibliographie.

Pour les incertitudes, il a été tenu compte :

- des incertitudes données par les auteurs ;
- de la dispersion des différentes déterminations pour une même composante ;
- de la proximité de composantes perturbatrices ;
- de la différence entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées.

TABLEAU 1

(unité : MHz ; s : incertitude-type estimée)

$\lambda \approx 515 \text{ nm}$; $^{127}\text{I}_2$, transition 43-0, P(13)					
Référence : composante a_3 (ou s), $f = 582\,490\,603,37 \text{ MHz}$ [1]					
Composante	$f(a_n) - f(a_3)$	s	Composante	$f(a_n) - f(a_3)$	s
a_1	- 131,770	0,001	a_{11}	393,962	0,002
a_2	- 59,905	0,001	a_{12}	435,599	0,003
a_3	0	—	a_{13}	499,712	0,005
a_4	76,049	0,002	a_{14}	518	1
a_5	203,229	0,005	a_{15}	587,396	0,002
a_6	240,774	0,005	a_{16}	616,756	0,005
a_7	255,005	0,001	a_{17}	660,932	0,005
a_8	338,699	0,005	a_{18}	740	1
a_9	349,717	0,005	a_{19}	742	1
a_{10}	369	1	a_{20}	757,631	0,010
			a_{21}	817,337	0,005

Réf. [2-5]

TABLEAU 2

(unité : MHz ; s : incertitude-type estimée)

$\lambda \approx 515$ nm ; $^{127}\text{I}_2$, transition 43-0, R(15)

Références	$\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ composante } a_3, 43-0, \text{P}(13), ^{127}\text{I}_2, f = 582\,490\,603,37 \text{ MHz [1]} \\ \bullet f(a_1) - f(a_3) = [-131,770 \pm 0,001] \text{ MHz, (Tableau 1)} \\ \bullet f(b_1) - f(a_1) = [283,835 \pm 0,005] \text{ MHz [3, 6]} \end{array} \right.$				
Composante	$f(b_n) - f(b_1)$	s	Composante	$f(b_n) - f(b_1)$	s
b_1	0	0,005	b_{11}	525,207	0,005
b_2	69,739	0,005	b_{12}	566,287	0,005
b_3	129,155	0,005	b_{13}	630,782	0,005
b_4	217	1	b_{14}	658,178	0,005
b_5	335,828	0,005	b_{15}	725,166	0,005
b_6	368	1	b_{16}	739,394	0,005
b_7	396,442	0,005	b_{17}	791,673	0,005
b_8	471	1	b_{18}	865,523	0,005
b_9	472	1	b_{19}	874,840	0,005
b_{10}	500,627	0,005	b_{20}	892,895	0,010
			b_{21}	947,278	0,010

Réf. [3, 4, 6]

TABLEAU 3

(unité : MHz ; s : incertitude-type estimée)

$\lambda \approx 515$ nm ; $^{127}\text{I}_2$, transition 58-1, R(98)

Références	$\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ composante } a_3, 43-0, \text{P}(13), ^{127}\text{I}_2, f = 582\,490\,603,37 \text{ MHz [1]} \\ \bullet f(d_6) - f(a_3) = [-2100 \pm 1] \text{ MHz [7]} \end{array} \right.$				
Composante	$f(d_n) - f(d_6)$	s	Composante	$f(d_n) - f(d_6)$	s
d_1	1	-413,488	d_8	8	200,478
d_2	2	-359,553	d_9	9	225,980
d_3	3	-194,521	d_{10}	10	253
d_4	4	-159,158	d_{11}	11	254
d_5	5	-105,769	d_{12}	12	314,131
d_6	6	0	d_{13}	13	426,691
d_7	7	172,200	d_{14}	14	481,574
			d_{15}	15	510,246

Réf. [4, 6, 7]

$\lambda \approx 543,5 \text{ nm}; {}^{127}\text{I}_2, \text{ transition } 26-0, \text{ R}(12)$

Composante	$f(a_n) - f(a_9)$	s	Composante	$f(a_n) - f(a_9)$	s
a ₁	- 482,822	0,015	a ₉	0	-
a ₂	- 230,450	0,015	a ₁₀	83,283	0,015
a ₃	- 220,688	0,028	a ₁₁	193,769	0,033
a ₄	- 173,917	0,015	a ₁₂	203,037	0,030
a ₅	- 168,710	0,015	a ₁₃	256,166	0,023
a ₆	- 116,493	0,015	a ₁₄	269,370	0,017
a ₇	- 72,983	0,015	a ₁₅	373,511	0,015
a ₈	- 53,724	0,015			

TABLEAU 5

 $\lambda \approx 543,5 \text{ nm}; {}^{127}\text{I}_2, \text{ transition } 28-0, \text{ R}(106)$

Composante	$f(b_n) - f(a_9)$	s	Composante	$f(b_n) - f(a_9)$	s
b ₁	105,637	0,016	b ₉	564,849	0,015
b ₂	358,943	0,015	b ₁₀	679,420	0,015
b ₃	387,823	0,016	b ₁₁	804,246	0,020
b ₄	397,265	0,015	b ₁₂	811,724	0,020
b ₅	425,741	0,020	b ₁₃	833,939	0,020
b ₆	506,727	0,015	b ₁₄	842,064	0,020
b ₇	519,996	0,017	b ₁₅	966,655	0,021
b ₈	551,661	0,021			

TABLEAU 6

 $\lambda \approx 576 \text{ nm}; {}^{127}\text{I}_2, \text{ transition } 17-1, \text{ P}(62)$

Composante			$f(a_n) - f(a_1)$	s	Composante			$f(a_n) - f(a_1)$	s
a ₁	o	0	—	a ₇	i	428,51	0,02		
a ₂	n	275,03	0,02	a ₈	h	440,17	0,02		
a ₃	m	287,05	0,02	a ₉	g	452,30	0,02		
a ₄	l	292,57	0,02	a ₁₀	f	579,43	0,03		
a ₅	k	304,26	0,02	—	—	—	—		
a ₆	j	416,67	0,02	a ₁₅	a	869,53	0,03		

Réf. [14, 15]

TABLEAU 7

(unité : MHz ; s : incertitude-type estimée)

$\lambda \approx 612$ nm ; $^{127}\text{I}_2$, transition 9-2, R(47)						
Référence : composante a_7 (ou o), $f = 489\,880\,354,9$ MHz [1]						
Composante		$f(a_n) - f(a_7)$	s	Composante		$f(a_n) - f(a_7)$ s
a_1	u	- 357,16	0,02	a_{11}	k	119,045 0,006
a_2	t	- 333,97	0,01	a_{12}	j	219,602 0,006
a_3	s	- 312,46	0,02	a_{13}	i	249,602 0,01
a_4	r	- 86,168	0,007	a_{14}	h	284,304 0,01
a_5	q	- 47,274	0,004	a_{15}	g	358,37 0,03
a_6	p	- 36,773	0,003	a_{16}	f	384,66 0,01
a_7	o	0	—	a_{17}	e	403,764 0,02
a_8	n	81,452	0,003	a_{18}	d	429,993 0,02
a_9	m	99,103	0,003	a_{19}	c	527,165 0,02
a_{10}	l	107,463	0,005	a_{20}	b	539,222 0,02
				a_{21}	a	555,093 0,02

Réf. [16, 18, 19, 21, 24]

TABLEAU 8

(unité : MHz ; s : incertitude-type estimée)

$\lambda \approx 612$ nm ; $^{127}\text{I}_2$, transition 11-3, P(48)					
Référence : composante a_7 , 9-2, R(47), $^{127}\text{I}_2$, $f = 489\,880\,354,9$ MHz [1]					
Composante		$f(b_n) - f(a_7, ^{127}\text{I}_2)$	s	Composante	$f(b_n) - f(a_7, ^{127}\text{I}_2)$ s
b_1		- 1034,75	0,07	b_9	- 579,91 0,01
b_2		- 755,86	0,05	b_{10}	- 452,163 0,005
b_3		- 748,28	0,03	b_{11}	- 316,6 0,4
b_4		- 738,35	0,04	b_{12}	- 315,8 0,4
b_5		- 731,396	0,006	b_{13}	- 297,42 0,03
b_6		- 616,01	0,03	b_{14}	- 294,72 0,03
b_7		- 602,42	0,03	b_{15}	- 160,318 0,003
b_8		- 593,98	0,01		

Réf. [16, 18, 19, 21, 24]

TABLEAU 9

(unité : MHz ; s : incertitude-type estimée)

$\lambda \approx 612$ nm ; $^{127}\text{I}_2$, transition 15-5, R(48)		
Référence : composante a_7 , 9-2, R(47), $^{127}\text{I}_2$, $f = 489\,880\,354,9$ MHz [1]		
Composante	$f(c_n) - f(a_7, ^{127}\text{I}_2)$	s
c_1	- 513,83	0,03
c_2	- 237,40	0,03
c_3	- 228,08	0,03
c_4	- 218,78	0,03
c_5	- 209,96	0,03
c_6	- 97,74	0,03
c_8	- 73,92	0,03
c_9	- 59,30	0,03

Réf. [16]

Réf. [25, 26]

TABLEAU 12

(unité : MHz; s : incertitude-type estimée)

$\lambda \approx 633 \text{ nm}$; $^{127}\text{I}_2$, transition 11-5, R(127)

Référence : composante a_{13} (ou i), $f = 473\,612\,214,705 \text{ MHz}$ [1]

Composante	$f(a_n) - f(a_{13})$	s	Composante	$f(a_n) - f(a_{13})$	s
a_2 t	- 582,9	0,5	a_{12} j	- 21,565	0,005
a_3 s	- 558,9	0,5	a_{13} i	0	—
a_4 r	- 320,73	0,01	a_{14} h	21,939	0,005
a_5 q	- 292,69	0,05	a_{15} g	125,694	0,005
a_6 p	- 290,29	0,05	a_{16} f	138,892	0,005
a_7 o	- 263,20	0,01	a_{17} e	152,255	0,005
a_8 n	- 162,814	0,005	a_{18} d	165,116	0,005
a_9 m	- 153,801	0,005	a_{19} c	283,006	0,005
a_{10} l	- 137,994	0,005	a_{20} b	291,100	0,005
a_{11} k	- 129,950	0,005	a_{21} a	299,931	0,005

Réf. [27-39]

TABLEAU 13

(unité : MHz; s : incertitude-type estimée)

$\lambda \approx 633 \text{ nm}$; $^{127}\text{I}_2$, transition 6-3, P(33)

Références $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ composante } a_{13}, 11-5, \text{ R}(127), ^{127}\text{I}_2, f = 473\,612\,214,705 \text{ MHz [1]} \\ \bullet f(b_{21}) - f(a_{13}, 11-5, \text{ R}(127)) = [-\,393,53 \pm 0,02] \text{ MHz [40]} \end{array} \right.$

Composante	$f(b_n) - f(b_{21})$	s	Composante	$f(b_n) - f(b_{21})$	s
b_1 u	- 922,57	0,02	b_{11} k	- 439,02	0,02
b_2 t	- 895,06	0,02	b_{12} j	- 347,36	0,02
b_3 s	- 869,68	0,02	b_{13} i	- 310,28	0,02
b_4 r	- 660,52	0,02	b_{14} h	- 263,60	0,02
b_5 q	- 610,71	0,02	b_{15} g	- 214,56	0,02
b_6 p	- 594,01	0,02	b_{16} f	- 179,30	0,02
b_7 o	- 547,42	0,02	b_{17} e	- 153,94	0,02
b_8 n	- 487,08	0,02	b_{18} d	- 118,22	0,02
b_9 m	- 461,27	0,02	b_{19} c	- 36,72	0,02
b_{10} l	- 453,23	0,02	b_{20} b	- 21,98	0,02
			b_{21} a	0	—

Réf. [35, 40, 41, 42]

TABLEAU 14

(unité : MHz ; s : incertitude-type estimée) $\lambda \approx 633 \text{ nm}$; $^{129}\text{I}_2$, transition 8-4, P(54)

Références $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ composante } a_{13}, 11-5, R(127), ^{127}\text{I}_2, f = 473\,612\,214,705 \text{ MHz [1]} \\ \bullet f(a_{28}, 8-4, P(54)) - f(a_{13}, 11-5, R(127)) = [95,90 \pm 0,04] \text{ MHz} \\ \quad [43, 44, 45] \end{array} \right.$

Composante				Composante			
$f(a_n) - f(a_{28})$		s		$f(a_n) - f(a_{28})$		s	
a ₂	z'	- 449	2	a ₁₅	j'	- 206,05	0,2
a ₃	y'	- 443	2	a ₁₆	i'	- 197,73	0,08
a ₄	x'	- 434	2	a ₁₇	h'	- 193,23	0,08
a ₅	w'	- 429	2	a ₁₈	g'	- 182,74	0,03
a ₆	v'	- 360,9	1	a ₁₉	f'	- 162,61	0,05
a ₇	u'	- 345,1	1	a ₂₀	e'	- 155,72	0,05
a ₈	t'	- 340,8	1	a ₂₁	d'	- 138,66	0,05
a ₉	s'	- 325,4	1	a ₂₂	c'	- 130,46	0,05
a ₁₀	r'	- 307,0	1	a ₂₃	a'	- 98,22	0,03
a ₁₁	q'	- 298,2	1	a ₂₄	n ₂	- 55,6 ^a	0,5
a ₁₂	p'	- 293,1	1	a ₂₅	n ₁		
a ₁₃	o'	- 289,7	1	a ₂₆	m ₂	- 43,08	0,03
a ₁₄	n'	- 282,7	1	a ₂₇	m ₁	- 41,24	0,05
				a ₂₈	k	0	-

Réf. [46-51]

^aaussi composante m_8 de 6-3, P(33), $^{127}\text{I}^{129}\text{I}$

TABLEAU 15

(unité : MHz ; s : incertitude-type estimée)

$\lambda \approx 633 \text{ nm}$; $^{129}\text{I}_2$, transition 12-6, P(69)						
Références $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ composante } a_{13}, 11-5, R(127), ^{127}\text{I}_2, f = 473\,612\,214,705 \text{ MHz [1]} \\ \bullet f(a_{28}, 8-4, P(54)) - f(a_{13}, 11-5, R(127)) = [95,90 \pm 0,04] \text{ MHz} \\ \quad [43, 44, 45] \end{array} \right.$						
Composante	$f(b_n) - f(a_{28}, ^{129}\text{I}_2)$	s	Composante	$f(b_n) - f(a_{28}, ^{129}\text{I}_2)$	s	
b_1	b''' 99,12	0,05	b_{20}	q' 507,66	0,10	
b_2	a''' 116,08	0,05	b_{22}	o' 535,65	0,10	
b_3	z'' 132,05	0,05	b_{23}	n' 536,59	0,10	
b_4	s'' 234,54	0,05	b_{24}	m' 545,06	0,05	
b_5	r'' 256,90 ^a	0,05	b_{25}	l' 560,94	0,05	
b_6	q'' 264,84 ^b	0,05	b_{26}	k' 566,19	0,05	
b_7	p'' 288,06	0,05	b_{27}	j' 586,27	0,03	
b_8	k'' 337,75	0,1	b_{28}	i' 601,78	0,03	
b_9	i''_1 } 358,8	0,5	b_{29}	h' 620,85	0,03	
b_{10}	i''_2 }		b_{30}	g' 632,42	0,03	
b_{11}	f'' 373,80	0,05	b_{31}	f' 644,09	0,03	
b_{12}	d'' 387,24	0,05	b_{32}	e' 655,47	0,03	
b_{13}	c'' 395,3	0,2	b_{33}	d' 666,81	0,10	
b_{14}	b'' 402,45	0,05	b_{34}	c' 692,45	0,10	
b_{15}	a'' 407	4	b_{35}	b' 697,96	0,10	
b_{16}	z' 412,37	0,05	b_{36}	a' 705,43	0,10	
b_{17}	y' 417	4				

Réf. [46, 49, 51]

^a aussi composante m_{28} de 6-3, P(33), $^{127}\text{I}^{129}\text{I}$ ^b aussi composante m_{29} de 6-3, P(33), $^{127}\text{I}^{129}\text{I}$

TABLEAU 18

(unité : MHz; s : incertitude-type estimée)

$\lambda \approx 633 \text{ nm}$; $^{127}\text{I}^{129}\text{I}$, transition 6-3, P(33)					
Références $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ composante } a_{13}, 11-5, R(127), ^{127}\text{I}_2, f = 473\,612\,214,705 \text{ MHz [1]} \\ \bullet f(a_{28}, 8-4, P(54)) - f(a_{13}, 11-5, R(127)) = [95,90 \pm 0,04] \text{ MHz} \\ \quad [43, 44, 45] \end{array} \right.$					
Composante	$f(m_n) - f(a_{28}, ^{129}\text{I}_2)$	s	Composante	$f(m_n) - f(a_{28}, ^{129}\text{I}_2)$	s
m ₁	m' - 254	3	m ₂₆	u'' 212,80	0,05
m ₂	l' - 233,71	0,10	m ₂₇	t'' 219,43	0,05
m ₃	k' - 226,14	0,10	m ₂₈	r'' 256,90	0,10
m ₄	j' - 207	1,5	m ₂₉	q'' 264,84	0,05
m ₅	b' - 117,79	0,10	m ₃₀	o'' 299,22	0,05
m ₆	p - 87,83	0,15	m ₃₁	n'' 312,43	0,05
m ₇	o - 78,2	0,5	m ₃₂	m'' 324,52	0,03
m ₈	n - 56 ^a	1	m ₃₃	l'' 333,14	0,03
m ₉	l - 17,55	0,05	m ₃₄	k'' ₂	337,7 0,5
m ₁₀	j - 12,04	0,03	m ₃₅	k'' ₁	
m ₁₁	i - 15,60	0,03	m ₃₆	j'' 345,05	0,05
m ₁₂	h - 33,16	0,03	m ₃₇	h'' 362,18	0,10
m ₁₃	g ₂ 39,9	0,2	m ₃₈	g'' 369,78	0,03
m ₁₄	g ₁ 41,3	0,2	m ₃₉	e'' 380,37	0,03
m ₁₅	f - 50,72	0,03	m ₄₀	d'' 385	4
m ₁₆	e - 54,06	0,10	m ₄₁	x' 431	4
m ₁₇	d - 69,33	0,03	m ₄₂	w' 445	4
m ₁₈	c - 75,06	0,03	m ₄₃	v' 456,7	0,5
m ₁₉	b - 80,00	0,03	m ₄₄	u' 477,17	0,05
m ₂₀	a - 95,00	0,03	m ₄₅	t' 486,43	0,05
m ₂₁	y'' 160,74	0,03	m ₄₆	s' 495,16	0,05
m ₂₂	x'' 199,52	0,03	m ₄₇	r' 503,55	0,05
m ₂₃	w'' 205,06	0,05	m ₄₈	p' 515,11	0,05
m ₂₄	v'' ₂	207,9 0,5			
m ₂₅	v'' ₁				

Réf. [34, 46, 49, 50, 51]

^a aussi composantes a₂₄ et a₂₅ de 8-4, P(54), $^{129}\text{I}_2$

TABLEAU 19

(unité : MHz; s : incertitude-type estimée)

$\lambda \approx 640 \text{ nm}$; $^{127}\text{I}_2$, transition 8-5, P(10)					
Référence : composante a_9 (ou g), $f = 468\,218\,332,4 \text{ MHz}$ [1]					
Composante	$f(a_n) - f(a_9)$	s	Composante	$f(a_n) - f(a_9)$	s
a_1	- 495,4	0,4	a_9	0	—
a_2	- 241,5	0,7	a_{10}	77,84	0,03
a_3	- 233,0	0,35	a_{11}	186,22	0,07
a_4	- 177,8	1,3	a_{12}	199,51	0,07
a_5	- 175,2	0,6	a_{13}	256,6	0,15
a_6	- 130,8	0,04	a_{14}	272,75	0,07
a_7	- 82,45	0,03	a_{15}	374,0	0,2
a_8	- 61,85	0,14			
Réf. [9, 19, 55-62]					

TABLEAU 20

(unité : MHz; s : incertitude-type estimée)

$\lambda \approx 640 \text{ nm}$; $^{127}\text{I}_2$, transition 8-5, R(16)		
Référence : composante a_9 , 8-5, P(10), $^{127}\text{I}_2$, $f = 468\,218\,332,4 \text{ MHz}$ [1]		
Composante	$f(b_n) - f(a_9)$	s
b_1	62,83	0,01
b_2	329,8	0,2
b_3	335,99	0,02
Réf. [9, 19, 55-62]		

Bibliographie

1. Recommandation M 1 (*BIPM Com. cons. déf. mètre*, 8^e session, 1992), adoptée par le Comité international des poids et mesures lors de sa 81^e session comme Recommandation 3 (CI-1992).
2. HACKEL L. A., CASLETON K. H., KUKOLICH S. G., EZEKIEL S., Observation of Magnetic Octupole and Scalar Spin-spin Interactions in I_2 Using Laser Spectroscopy, *Phys. Rev. Lett.*, 1975, **35**, 568-571.
3. CAMY G., *Thèse*, Université Paris-Nord, 1979.
4. BORDÉ C. J., CAMY G., DECOMPS B., DESCOUBES J.-P., High Precision Saturation Spectroscopy of $^{127}I_2$ with Argon Lasers at 5145 Å and 5017 Å: Main Resonances, *J. Phys.*, 1981, **42**, 1393-1411.
5. SPIEWECK F., GLÄSER M., FOTH H. J., Hyperfine Structure of the P(13), 43-0 Line of $^{127}I_2$ at 514,5 nm, European Conference on Atomic Physics, Apr. 6-10, 1981, Heidelberg. *Europhysics Conference Abstracts*, **5A**, Part I, 325-326.
6. SPIEWECK G., communication privée.
7. FOTH H. J., SPIEWECK F., Hyperfine Structure of the R(98), 58-1 Line of $^{127}I_2$ at 514,5 nm, *Chem. Phys. Lett.*, 1979, **65**, 347-352.
8. CHARTIER J.-M., HALL J. L., GLÄSER M., Identification of the I_2 -saturated Absorption Lines Excited at 543 nm with the External Beam of the Green He-Ne Laser, *Proc. CPEM'86*, 1986, 323.
9. GLÄSER M., Hyperfine Components of Iodine for Optical Frequency Standards, *PTB-Bericht*, 1987, **PTB-Opt-25**, 325 p.
10. CHARTIER J.-M., FREDIN-PICARD S., ROBERTSSON L., Frequency-stabilized 543 nm He-Ne Laser Systems: a New Candidate for the Realization of the Metre?, *Opt. Commun.*, 1989, **74**, 87-92.
11. BRAND U., Ein iodstabilisiertes He-Ne Laser Wellenlängennormal grüner Strahlung, *PTB-Bericht*, 1991, **PTB-Opt-34**, 1-109.
12. SIMONSEN H., POULSEN O., Frequency Stabilization of an Internal Mirror He-Ne Laser at 543,4 nm to I_2 -saturated Absorptions, *Appl. Phys.*, 1990, **B50**, 7-12.
13. FREDIN-PICARD S., RAZET A., On the Hyperfine Structure of $^{127}I_2$ Lines at the 543 nm Wavelength of the He-Ne Laser, *Opt. Commun.*, 1990, **78**, 149-152.
14. BAIRD K. M., EVENSON K. M., HANES G. R., JENNINGS D. A., PETERSEN F. R., Extension of Absolute Frequency Measurements to the Visible: Frequency of Ten Hyperfine Components of Iodine, *Opt. Lett.*, 1979, **4**, 263-264.
15. BARWOOD G. P., ROWLEY W. R. C., Characteristics of a $^{127}I_2$ -Stabilized Dye Laser at 576 nm, *Metrologia*, 1984, **20**, 19-23.

16. RAZET A., MILLERIOUX Y., JUNCAR P., Hyperfine Structure of the 47R(9-2), 48P(11-3) and 48R(15-5) Lines of $^{127}\text{I}_2$ at 612 nm as Secondary Standards of Optical Frequency, *Metrologia*, 1991, **28**, 309-316.
17. CÉREZ P., BENNETT S. J., Helium-Neon Laser Stabilized by Saturated Absorption in Iodine at 612 nm, *Appl. Opt.*, 1979, **18**, 1079-1083.
18. GLÄSER M., Properties of a He-Ne Laser at $\lambda = 612$ nm, Stabilized by Means of an External Iodine Absorption Cell, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1987, **IM-36**, 604-608.
19. BERTINETTO F., CORDIALE P., FONTANA S., PICOTTO G. B., Recent Progresses in He-Ne Lasers Stabilized to $^{127}\text{I}_2$, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1985, **IM-34**, 256-261.
20. BERTINETTO F., CORDIALE P., PICOTTO G. B., CHARTIER J.-M., FELDER R., GLÄSER M., Comparison Between the $^{127}\text{I}_2$ -stabilized He-Ne Lasers at 633 nm and at 612 nm of the BIPM and the IMGC, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1983, **IM-32**, 72-76.
21. GLÄSER M., Hyperfine Components of Iodine for Optical Frequency Standards, *PTB-Bericht*, 1987, **PTB-Opt-25**, 325 p.
22. DSCHAO K., GLÄSER M., HELMCKE J., I_2 -Stabilized He-Ne Lasers at 612 nm, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1980, **IM-29**, 354-357.
23. BERTINETTO F., communication privée, poster présenté à la *CPEM'84*, Delft.
24. ROBERTSSON L., Lasers à He-Ne asservis sur l'absorption saturée de l'iode en cuve interne ou externe à $\lambda = 612$ nm, *BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1992, **60** et document CCDM/92-20a (BIPM).
25. CIDDOR P. E., BROWN N., Hyperfine Spectra in Iodine 129 at 612 nm, *Opt. Commun.*, 1980, **34**, 53-56.
26. GLÄSER M., DSCHAO K., FOTH H. J., Hyperfine Structure and Fluorescence Analysis of Enriched $^{129}\text{I}_2$ at the 612 nm Wavelength of the He-Ne Laser, *Opt. Commun.*, 1981, **38**, 119-123.
27. ROWLEY W. R. C., WALLARD A. J., Wavelength Values of the 633 nm Laser, Stabilized with $^{127}\text{I}_2$ -saturated Absorption, *J. Phys. E.*, 1973, **6**, 647-651.
28. HANES G. R., BAIRD K. M., DE REMIGIS J., Stability, Reproducibility, and Absolute Wavelength of a 633 nm He-Ne Laser Stabilized to an Iodine Hyperfine Component, *Appl. Opt.*, 1973, **12**, 1600-1605.
29. CÉREZ P., BRILLET A., HARTMANN F., Metrological Properties of the R(127) Line of Iodine Studied by Laser Saturated Absorption, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1974, **IM-23**, 526-528.
30. BAYER-HELMS F., CHARTIER J.-M., HELMCKE J., WALLARD A. J., Evaluation of the International Intercomparison Measurements (March 1976) with $^{127}\text{I}_2$ -stabilized He-Ne Lasers, *PTB-Bericht*, 1977, **Me-17**, 139-146.

31. BERTINETTO F., REBAGLIA B. I., Performances of IMGC He-Ne ($^{127}\text{I}_2$) Lasers, *Eurometas.* 77, IEEE, 1977, **152**, 38-39.
32. TANAKA K., SAKURAI T., KUROSAWA T., Frequency Stability and Reproducibility of an Iodine Stabilized He-Ne Laser, *Jap. J. Appl. Phys.*, 1977, **16**, 2071-2072.
33. BLABLA J., SMYDKE J., CHARTIER J.-M., GLÄSER M., Comparison of the $^{127}\text{I}_2$ -stabilized He-Ne Lasers at 633 nm Wavelength of the Czechoslovak Institute of Metrology and the Bureau International des Poids et Mesures, *Metrologia*, 1983, **19**, 73-75, et document CCDM/82-26.
34. Document CCDM/82-19a (Moyennes des mesures effectuées durant les comparaisons internationales entre le BIPM, le LHA, le NPL, la PTB, l'IMGC, l'INM, le NBS, le NIM et le CSMU, 1974-1981).
35. MORINAGA A., TANAKA K., Hyperfine Structure in the Electronic Spectrum of $^{127}\text{I}_2$ by Saturated Absorption Spectroscopy at 633 nm, *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**, 114-116.
36. BLABLA J., BARTOS M., SMYDKE J., WEBER T., HANTKE D., PHILLIP H., SOMMER M., TSCHIRNICH J., Frequency Intervals of HFS Components of an $^{127}\text{I}_2$ -stabilized He-Ne Laser at 633 nm Wavelength, *ASMW Metrologische Abhandlungen*, 1983, **3**, 4.
37. CHARTIER J.-M., Results of International Comparisons Using Methane-stabilized He-Ne Lasers at 3,39 μm and Iodine Stabilized He-Ne Lasers at 633 nm, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1983, **IM-32**, 81-83.
38. CHARTIER J.-M., ROBERTSSON L., FREDIN-PICARD S., Recent Activities at BIPM in the Field of Stabilized Lasers - Radiations Recommended for the Definition of the Meter, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1991, **40**, 181-184.
39. PETRU F., POPELA B., VESELA Z., Iodine Stabilized He-Ne Lasers at $\lambda = 633 \text{ nm}$ of a Compact Construction, *Metrologia*, 1992, **29**, 301-307.
40. RAZET A., GAGNIÈRE J., JUNCAR P., Hyperfine Structure Analysis of the 33P (6-3) Line of $^{127}\text{I}_2$ at 633 nm Using a Continuous-wave Tunable Dye Laser, *Metrologia*, 1993, **30**, 61-65.
(Cette publication donne $f_{b_{21}} - f_{a_{16} \text{ (ou f)}}$ = - [532,425 \pm 0,015] MHz à partir de la différence de fréquence $f_{a_{16}} - f_{a_{13}}$ = [138,892 \pm 0,005] MHz [tableau 12], on calcule : $f_{b_{21}} - f_{a_{13}}$ = - [393,533 \pm 0,016] MHz.)
et document CCDM/92-19a (INM).
41. HANES G. R., LAPIERRE J., BUNKER P. R., SCHOTTON K. C., Nuclear Hyperfine Structure in the Electronic Spectrum of $^{127}\text{I}_2$ by Saturated Absorption Spectroscopy, and Comparison with Theory, *J. Mol. Spectrosc.*, 1971, **39**, 506-515.

42. BERGQUIST J. C., DANIEL H. U., A Wideband Frequency-offset Locked Dye Laser Spectrometer Using a Schottky Barrier Mixer, *Opt. Commun.*, 1984, **48**, 327-333.
43. ROWLEY W. R. C., document CCDM/82-2 (mesures à $t_{129\text{ I}_2} = t_{127\text{ I}_2} = 8\text{ }^\circ\text{C}$).
44. CHARTIER J.-M., Détermination et reproductibilité de l'intervalle de fréquence ($^{129}\text{I}_2$, k) – ($^{127}\text{I}_2$, i), *Rapport BIPM-82/10* (mesures à $t_{129\text{ I}_2} = t_{127\text{ I}_2} = 8\text{ }^\circ\text{C}$).
45. CHARTIER J.-M., Lasers à He-Ne asservis sur l'absorption saturée de l'iode en cuve interne à $\lambda = 633\text{ nm}$, *BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1989, **52**, 44.
46. GERLACH R. W., *Thèse*, Université de Cleveland, 1975.
47. KNOX J. D., YOH-HAN PAO, High-resolution Saturation Spectra of the Iodine Isotope $^{129}\text{I}_2$ in the 633 nm Wavelength Region, *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **18**, 360-362.
48. TESIC M., YOH-HAN PAO, Theoretical Assignment of the Observed Hyperfine Structure in the Saturated Absorption Spectra of $^{129}\text{I}_2$ and $^{127}\text{I}^{129}\text{I}$ vapors in the 633 nm Wavelength Region, *J. Mol. Spectrosc.*, 1975, **57**, 75-96.
49. MAGYAR J. A., BROWN N., High Resolution Saturated Absorption Spectra of Iodine Molecules $^{129}\text{I}_2$, $^{129}\text{I}^{127}\text{I}$, and $^{127}\text{I}_2$ at 633 nm, *Metrologia*, 1980, **16**, 63-68.
50. CHARTIER J.-M., Mesures d'intervalles entre composantes hyperfines de I_2 , *BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1978, **46**, 32-33.
51. CHARTIER J.-M., Mesures d'intervalles de fréquence entre composantes hyperfines des transitions 8-4, P(54); 12-6, P(69); 6-3, P(33) de $^{129}\text{I}_2$ et 6-3, P(33) de $^{127}\text{I}^{129}\text{I}$, *Rapport BIPM-93/3* et document CCDM/92-20a (BIPM).
52. SCHWEITZER Jr. W. G., KESSLER Jr. E. G., DESLATTES R. D., LAYER H. P., WHETSTONE J. R., Description, Performances, and Wavelengths of Iodine Stabilized Lasers, *Appl. Opt.*, 1973, **12**, 2927-2938.
53. HELMCKE J., BAYER-HELMS F., He-Ne Stabilized by Saturated Absorption in I_2 , *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1974, **IM-23**, 529-531 (mesures réduites à $t_{129\text{ I}_2} = t_{127\text{ I}_2} = 2\text{ }^\circ\text{C}$).
54. CHARTIER J.-M., Lasers à He-Ne asservis sur l'absorption saturée de l'iode en cuve interne ($\lambda = 633\text{ nm}$), *BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1985, **53**, 50.
55. BENNETT S. J., CÉREZ P., Hyperfine Structure in Iodine at the 612 nm and 640 nm Helium-neon Wavelengths, *Opt. Commun.*, 1978, **25**, 343-347.
56. DSCHAO K., JIE X., CHEN-YANG L., HAN-TIAN L., Hyperfine Structure in Iodine Observed at the 612 nm and 640 nm ^3He - ^{22}Ne Laser Wavelengths, *Acta Metrologica Sinica*, 1982, **3**, 322-323 et document CCDM/92-10-2a (NIM).

57. ZHAO K., HUA L., Hyperfine Structure of Iodine at 640 nm ^3He - ^{22}Ne Laser Wavelength and Identification, *Acta Metrologica Sinica*, 1983, **3**, 673-677 et document CCDM/92-10-2d (NIM).
 58. BENNETT S. J., MILLS-BAKER P., He-Ne Stabilized 640 nm Helium-neon, *Opt. Commun.*, 1984, **51**, 322-324.
 59. ZHAO K. G., BLABLA J., HELMCKE J., $^{127}\text{I}_2$ -Stabilized ^3He - ^{22}Ne Laser at 640 nm Wavelength, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1985, **IM-34**, 252-256 et documents CCDM/92-10a et 10-2c (NIM).
 60. ZHAO K., HUA L., Analysis and Calculation of Hyperfine Lines of Iodine Molecule, *Acta Metrologica Sinica*, 1985, **6**, 83-88 et document CCDM/92-10-2c (NIM).
 61. GLÄSER M., Identification of Hyperfine Structure Components of Iodine Molecule at 640 nm Wavelength, *Opt. Commun.*, 1985, **54**, 335-342.
 62. ZHAO K., CHENG-YANG L., HUA L., JIE X., HE W., Investigations of $^{127}\text{I}_2$ -stabilized He-Ne Laser at 640 nm, *Acta Metrologica Sinica*, 1987, **8**, 88-95 et document CCDM/92-10-2f (NIM).
-

ANNEXE M 4

Questionnaire adressé par le BIPM aux laboratoires membres du CCDM

M 4A Questionnaire

1. Mesures absolues de fréquence

- 1.1 Avez-vous fait des mesures absolues de fréquence de radiations recommandées dans la mise en pratique de la définition du mètre ou d'autres radiations? Dans l'affirmative, donnez la liste des valeurs obtenues avec leur incertitude.
- 1.2 Envisagez-vous de faire des mesures absolues de fréquence dans le spectre visible? Dans l'affirmative, décrivez la chaîne de fréquence que vous avez l'intention d'utiliser.

2. Mesures de rapport de fréquences

- 2.1 Avez-vous mesuré le rapport de fréquences de radiations recommandées dans la mise en pratique de la définition du mètre ou d'autres radiations? Dans l'affirmative, donnez la liste des valeurs obtenues avec leur incertitude.
- 2.2 Envisagez-vous de mesurer le rapport de fréquences? Dans l'affirmative, décrivez brièvement l'instrument que vous pensez utiliser et l'incertitude que vous espérez obtenir.

3. Mise en pratique de la définition du mètre

- 3.1 Avez-vous des propositions à formuler pour changer des valeurs de fréquences, longueurs d'onde ou incertitudes données dans la mise en pratique de la définition du mètre? Dans l'affirmative, décrivez-les brièvement.

- 3.2 Proposez-vous d'inclure des radiations supplémentaires dans la mise en pratique ? Dans l'affirmative, donnez brièvement vos arguments en faveur de ces nouvelles radiations.
- 3.3 Proposez-vous de modifier les conditions de fonctionnement de lasers mentionnées dans la mise en pratique, avec une grande exactitude, de la définition du mètre ? Est-il pour cela nécessaire d'inclure des conditions relatives à des paramètres supplémentaires ?
- 3.4 Quelles sont les radiations et fréquences recommandées dans la mise en pratique que vous utilisez dans votre laboratoire pour la réalisation de la définition du mètre et quelle est votre estimation des incertitudes de réalisation ?
- 3.5 Avez-vous étudié ou étudiez-vous actuellement de nouvelles méthodes qui pourraient améliorer la reproductibilité de fréquence des radiations recommandées pour la définition du mètre ou d'autres radiations ? Dans l'affirmative, décrivez brièvement ces méthodes et l'avancement des travaux.

4. Comparaisons internationales de fréquence de lasers

- 4.1 Quelles sont les comparaisons de fréquence de lasers auxquelles vous avez participé ? Précisez :
 - a) les fréquences et longueurs d'onde,
 - b) les laboratoires participants,
 - c) les résultats ou la référence de la publication donnant les résultats.
- 4.2 Quelles sont les comparaisons internationales de radiations et de fréquences auxquelles vous souhaiteriez participer à l'avenir ?

5. Étalons matériels de longueur

- 5.1 Quels sont les types d'étalons de longueur étalonnés dans votre laboratoire (règles, étalons à bouts, calibres, etc.) ? Quelles sont les incertitudes associées ?
- 5.2 Y-a-t'il plus, autant ou moins de demandes pour ces types d'étalonnages ? Y-a-t'il des demandes pour en accroître l'exactitude ?
- 5.3 Avez-vous à signaler de nouveaux domaines de la métrologie des longueurs susceptibles de retenir votre attention à l'avenir ?

- 5.4 Certains domaines de la métrologie des longueurs devraient-ils faire l'objet d'une comparaison internationale entre laboratoires nationaux ?
- 5.5 Quels moyens utilisez-vous pour déterminer l'indice de réfraction de l'air pour la comparaison d'étalons de longueur d'onde et d'étalons matériels de longueur ?

M 4B Résumé des réponses*

Ce résumé est extrait des documents suivants :

CCDM/92-4a	NRC	(Canada)
/92-5a	CSIRO	(Australie)
/92-6a	IMGC	(Italie)
/92-7a	VNIIM	(Féd. de Russie)
/92-8a	LPI	(Féd. de Russie)
/92-9a	VNIIFTRI	(Féd. de Russie)
/92-10a	NIM	(Rép. pop. de Chine)
/92-11a	NIST	(É.-U. d'Amérique)
/92-12a	NPL	(Royaume-Uni)
/92-13a	NRLM	(Japon)
/92-14a	PTB	(Allemagne)
/92-15a	CSMU	(Tchéco-Slovaquie)
/92-16a	CSIR	(Afrique du Sud)
/92-17a	OFMET	(Suisse)
/92-18a	DSIR	(Nouvelle-Zélande)
/92-19a	INM/LNE	(France)
/92-20a	BIPM	
/92-21a	KRISS	(Rép. de Corée)
/92-23a	IPL	(Féd. de Russie)
/92-24a	JILA/NIST	(É.-U. d'Amérique)

* Dans leur réponse au questionnaire envoyé par le BIPM, la plupart des laboratoires ont présenté les incertitudes de leurs résultats sous la forme \pm une valeur, souvent sans indiquer s'il s'agissait d'un ou de trois écarts-types.

Dans ce rapport, les incertitudes présentées sous cette même forme doivent être considérées comme représentant un écart-type (1σ).

D'autres laboratoires, dont le BIPM, ont préféré utiliser l'expression recommandée "incertitude-type" lorsque l'incertitude donnée est un écart-type (1σ).

1. Mesures absolues de fréquence

1.1 Avez-vous fait des mesures absolues de fréquence de radiations recommandées dans la mise en pratique de la définition du mètre ou d'autres radiations? Dans l'affirmative, donnez la liste des valeurs obtenues avec leur incertitude.

NRC Des mesures absolues de fréquence de la radiation d'un laser à He-Ne asservi sur la composante $F_2^{(2)}$ de la transition ν_3 , bande P(7) de la molécule CH_4 ont été faites du 1989-03-29 au 1991-05-10. La moyenne non pondérée et l'incertitude-type de neuf mesures différentes sont les suivantes :

$$f = 88\,376\,181\,599,415 \text{ kHz, avec une incertitude-type de } 0,104 \text{ kHz,}$$

(voir l'annexe A du document CCDDM/92-4a et document CCDDM/92-4b).

CSIRO Non.

IMGC Des mesures de fréquence ont été faites sur deux transitions de $^{14}\text{NH}_3$:

$$\nu_{sQ}(7,7) = (1\,138\,211,0 \pm 0,5) \text{ MHz;}$$

$$\nu_{aR}(7,7) = (3\,679\,592,5 \pm 0,5) \text{ MHz.}$$

(document CCDDM/92-6d).

VNIIM Pas de réponse.

LPI Des mesures absolues de fréquence ont été faites à l'aide des chaînes de synthèse de fréquence radio-optiques de la PTB (1991) et du VNIIFTRI (1992) sur un laser à He-Ne/ CH_4 transportable, à $\lambda = 3,39 \text{ }\mu\text{m}$, asservi sur la composante centrale (structure hyperfine magnétique résolue) de la raie $F_2^{(2)}$ du méthane.

Les résultats suivants ont été obtenus :

PTB : $f = (88\,376\,181\,600\,290 \pm 35) \text{ Hz;}$

VNIIFTRI : $f = (88\,376\,181\,600\,018 \pm 100) \text{ Hz;}$

où l'incertitude indiquée représente l'incertitude moyenne quadratique dans une série de mesures.

L'écart quadratique moyen entre les valeurs moyennes des six séries de mesures faites à la PTB et entre les deux séries de mesures faites au VNIIFTRI était respectivement de 5 Hz et 3 Hz.

VNIIFTRI Des mesures absolues de fréquence de la transition $F_2^{(2)}$ de la radiation du méthane d'un laser à He-Ne/ CH_4 à $\lambda = 3,39 \text{ }\mu\text{m}$,

faites de 1985 à 1992 (sept mesures différentes), avec un laser transportable asservi sur le signal optogalvanique, dénommé M 101, ont donné le résultat suivant :

$$f = (88\,376\,181\,601,77 \pm 0,52) \text{ kHz.}$$

On propose les valeurs suivantes, fondées sur des mesures faites avec la chaîne de fréquence du VNIIFTRI :

fréquence de la composante centrale (LPI et PTB) :

$$f = (88\,376\,181\,600,04 \pm 0,45) \text{ kHz;}$$

transition non résolue (BIPM, VNIIFTRI, NRLM) :

$$f = (88\,378\,181\,600,0 \pm 6,6) \text{ kHz.}$$

Les incertitudes données pour ces deux dernières mesures sont égales à trois fois l'incertitude-type. Toutes les mesures ont été faites de 1985 à 1992.

NIM	Pas de réponse.
NIST	Non.
NPL	Non.
NRLM	Des mesures de la radiation d'un laser à He-Ne/CH ₄ à $\lambda = 3,39 \text{ }\mu\text{m}$ donnent : $f = (88\,376\,181,73 \pm 0,20) \text{ MHz.}$
PTB	Des mesures absolues de fréquence de la composante centrale de la structure hyperfine de la transition ν_3 , composante $F_2^{(2)} \text{ P}(7)$, de CH ₄ à $\lambda = 3,39 \text{ }\mu\text{m}$, ont été faites en utilisant la technique d'excitation linéaire de Ramsey dans un jet moléculaire. On a mesuré la valeur suivante : $f = (88\,376\,181\,600,16 \pm 0,20) \text{ kHz.}$ (document CCDM/92-14d).
CSMU	Non.
CSIR	Non.
OFMET	Non.
DSIR	Non.
INM	1. En septembre 1986, au LPTF (Paris), mesures de la radiation de lasers à He-Ne/CH ₄ à $\lambda = 3,39 \text{ }\mu\text{m}$. Laser M 101 (VNIIFTRI, Féd. de Russie) : $f = (88\,376\,181\,601,94 \pm 0,15) \text{ kHz;}$

Laser B.3 (BIPM) :

$$f_c = (88\,376\,181\,597,52 \pm 0,64) \text{ kHz},$$

$$f_{t(B.3)} - f_c(B.3) = (3,23 \pm 0,61) \text{ kHz},$$

(document CCDM/92-19e).

L'indice c ou l'indice t signifient respectivement que le photorécepteur du système d'asservissement est placé à la sortie du laser, soit du côté de la cuve d'absorption (c), soit du côté du tube à décharge (t).

2. En 1983, au LPTF (Villetaneuse), mesure de la radiation d'un laser à CO_2/OsO_4 à $\lambda = 10 \text{ }\mu\text{m}$:

$$f_{\text{CO}_2 \text{ R}(10)/\text{OsO}_4} = (29\,054\,057\,446,66 \pm 0,05) \text{ kHz},$$

(document CCDM/92-19c).

3. En 1986, au LPTF (Paris), mesure de la radiation d'un laser à CO_2/OsO_4 à $\lambda = 10 \text{ }\mu\text{m}$:

$$f_{\text{CO}_2 \text{ R}(12)/\text{OsO}_4} = (29\,096\,274\,952,34 \pm 0,07) \text{ kHz},$$

(document CCDM/92-19e).

4. En 1989, mesure de la radiation d'un laser à CO_2/OsO_4 à $\lambda = 10 \text{ }\mu\text{m}$:

$$f_{\text{CO}_2 \text{ R}(10)/\text{OsO}_4} = (29\,054\,072\,700,965 \pm 0,050) \text{ kHz}.$$

5. En 1991, mesure de la radiation d'un laser à CO_2/OsO_4 à $\lambda = 10 \text{ }\mu\text{m}$:

$$f_{\text{CO}_2 \text{ R}(26)/\text{OsO}_4} = (29\,370\,814\,078,41 \pm 0,08) \text{ kHz},$$

(document CCDM/92-19b).

6. En 1992, au LPTF (Paris), mesure de la radiation d'un laser à $\text{He-Ne}/^{127}\text{I}_2$ à $\lambda = 633 \text{ nm}$: composante f de R(127) 11-5 :

$$f_f = 473\,612\,353\,586 \text{ kHz}, \text{ avec une incertitude-type de } 3,4 \text{ kHz},$$

- si $f_i - f_f = 138\,892 \text{ kHz},$ avec une incertitude-type de 5 kHz,

$$f_i = 473\,612\,214\,694 \text{ kHz}, \text{ avec une incertitude-type de } 6 \text{ kHz}.$$

BIPM

1. En septembre 1986 au LPTF (Paris), mesure de la radiation d'un laser à $\text{He-Ne}/\text{CH}_4$ à $\lambda = 3,39 \text{ }\mu\text{m}$ produite par le laser B.3 du BIPM :

$$f_{t(B.3)} = 88\,376\,181\,600,75 \text{ kHz}, \text{ avec une incertitude-type de } 0,24 \text{ kHz},$$

(document CCDM/92-19c).

L'indice t signifie que le récepteur d'asservissement est placé du côté tube à décharge.

2. En décembre 1988 au NRC (Ottawa), mesure de la radiation du laser VB du BIPM :
 $f_{VB} = 88\,376\,181\,603,17$ kHz, avec une incertitude-type de 1,0 kHz,
 (document CCDM/92-20i).
3. En 1992 au LPTF (Paris), mesure de la radiation de lasers à He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ à $\lambda = 633$ nm, composante f de R(127) 11-6, produite par le laser INM12 de l'INM et le laser BIPM4 du BIPM :
 $f_{\text{INM12}_f} = 473\,612\,353\,586$ kHz, avec une incertitude-type de 3,4 kHz,
 (document CCDM/92-19a);
 $f_{\text{INM12}_f} - f_{\text{BIPM4}} = -11,4$ kHz, avec une incertitude-type de 1,5 kHz;
 $f_{\text{BIPM4}_f} = 473\,612\,353\,597$ kHz, avec une incertitude-type de 3,7 kHz,
 (document CCDM/92-20a).

KRISS Non.

IPL Depuis le début de 1981, l'Institut de physique des lasers de l'Académie des sciences de Russie (Sibérie) effectue des mesures absolues des raies d'absorption du méthane $F_2^{(2)}$ et E ($\lambda = 3,39$ μm) :

$$f_{\text{CH}_4}(F_2^{(2)}) = (88\,376\,181\,603 \pm 3) \text{ kHz (1981);}$$

$$f_{\text{CH}_4}(F_2^{(2)}) = (88\,376\,181\,602,9 \pm 1,2) \text{ kHz (1983);}$$

$$f_{\text{CH}_4}(F_2^{(2)}) = (88\,376\,181\,600,7 \pm 0,5) \text{ kHz (1987)**;}$$

$$f_{\text{CH}_4}(F_2^{(2)}) = (88\,376\,181\,600,47 \pm 0,1) \text{ kHz (1988)**;}$$

$$f_{\text{CH}_4}(F_2^{(2)}) = (88\,376\,181\,600,46 \pm 0,1) \text{ kHz (1989)**;}$$

$$f_{\text{CH}_4}(F_2^{(2)}) = (88\,376\,181\,600,4 \pm 0,1) \text{ kHz (1991)**;}$$

$$f_{\text{CH}_4}(E) = (88\,373\,149\,031,2 \pm 1,2) \text{ kHz (1985).}$$

JILA Pas de réponse.

** Fréquence absolue de la transition (7-6) de la structure hyperfine magnétique de la raie du méthane $F_2^{(2)} P(7)\nu_3$. Les mesures ont été faites avec la structure hyperfine magnétique résolue de la raie d'absorption $F_2^{(2)}$ du méthane.

1.2 Envisagez-vous de faire des mesures absolues de fréquence dans le spectre visible? Dans l'affirmative, décrivez la chaîne de fréquence que vous avez l'intention d'utiliser.

NRC	<p>Le NRC envisage sérieusement de mesurer :</p> <p>la radiation d'un laser à He-Ne/I₂ à 474 THz ;</p> <p>la radiation d'un laser à He-Ne à fréquence doublée asservi sur I₂ à 520 THz ;</p> <p>la transition d'horloge à 445 THz de l'ion Sr⁺ (disponible d'ici 1 an).</p> <p>La chaîne de fréquence est décrite dans le document CCDDM/92-4a.</p>
CSIRO	<p>Pas d'activité dans ce domaine.</p>
IMGC	<p>Aucune activité n'est envisagée pour le moment.</p>
VNIIM	<p>Pas de réponse.</p>
LPI	<p>Aucune activité n'est envisagée dans le spectre visible, mais le laser à He-Ne/CH₄ transportable à structure hyperfine résolue pourrait remplacer la partie basse fréquence des chaînes de synthèse de fréquence radio-optiques sans perte d'exactitude (avec une reproductibilité de 3×10^{-13}, approchant celle des étalons à jet de césium).</p> <p>La chaîne de fréquence est décrite dans le document CCDDM/92-8a.</p>
VNIIFTRI	<p>Pas de réponse.</p>
NIM	<p>Pas de réponse.</p>
NIST	<p>Le NIST est intéressé par des mesures de fréquence de la transition d'un laser à ions Hg (532 375,92 GHz) qui est en construction pour servir d'étalon de fréquence ou de longueur.</p>
NPL	<p>Oui. Les longueurs d'onde envisagées pour le moment sont 674 nm (transition étroite d'ions Sr⁺ refroidis), 411 nm et 467 nm (transitions étroites d'ions Yb⁺ refroidis).</p>
NRLM	<p>Le NRLM envisage des mesures absolues de fréquence d'un laser à colorant asservi sur le calcium. Des mesures absolues de fréquence dans la région de 1,5 µm fourniraient un point de référence utile.</p>

PTB	Des mesures absolues de fréquence de la transition de la raie d'intercombinaison $^3P_1-^1S_0$ du ^{40}Ca à $\lambda = 657 \text{ nm}$ sont en préparation, en partant de la fréquence d'un laser à CO_2 . (document CCDM/92-14g).
CSMU	Non.
CSIR	Non.
OFMET	Non.
DSIR	Non.
INM	La chaîne de fréquence du LPTF est décrite dans le document CCDM/92-19a.
BIPM	Pas de réponse.
KRISS	Non.
IPL	L'IPL envisage d'entreprendre en 1993-1994 d'autres mesures absolues de fréquence de la transition (7-6) $F_2^{(2)} P(7) \nu_3$ du méthane avec une plus grande exactitude.
JILA	Pas de réponse.

2. Mesures de rapport de fréquences

2.1 Avez-vous mesuré le rapport de fréquences de radiations recommandées dans la mise en pratique de la définition du mètre ou d'autres radiations ? Dans l'affirmative, donnez la liste des valeurs obtenues avec leur incertitude.

NRC	Non, pas depuis 1973.
CSIRO	Pas d'activité dans ce domaine.
IMGC	L'IMGC a fait quatre séries de mesures de rapports de fréquences entre : 1. lasers à CO_2 à $10,6 \mu\text{m}$ et lasers à He-Ne à $3,39 \mu\text{m}$: $f_{\text{CO}_2\text{R}(32)} = (29477\,160\,862 \pm 12) \text{ kHz}$. (document CCDM/92-6e);

2. lasers à He-Ne à 612 nm, 640 nm et 633 nm (IMGC et BIPM, novembre 1985). Les résultats sont donnés dans le document CCDM/92-6a ;
3. transitions RuO_4 et CO_2 ;
4. transitions $^{188}\text{OsO}_4$ et CO_2 .
(documents CCDM/92-6f, h et i).

VNIIM Le VNIIM a mesuré les rapports de fréquences entre les radiations des lasers à He-Ne à 3,39 μm et à 633 nm ; à 633 nm et à 612 nm.

Les résultats sont donnés dans le document CCDM/92-7a.

[VITUSHKIN L. F., ZAKHARENKO YU. G., KOROTKOV V. I., LEIBENGARDT G. I., MEL'NIKOV N. A., SHUR V. L., Measurement of the Emission Wavelength of He-Ne/ I_2 Laser of the State Primary Length-unit Standard (en russe), *Optika i Spektroskopia*, 1988, **65**, 1186-1188, traduit en anglais dans *Optics and Spectroscopy*, 1988, **65**, 699-700].

[VITUSHKIN L. F., ZAKHARENKO YU. G., IVANOV I. V., LEIBENGARDT G. I., SHUR V. L., Measurement of the Wavelength of Highly Stable He-Ne/ I_2 Laser at 612 nm (en russe), *Optika i Spektroskopia*, 1990, **68**, 705-707, traduit en anglais dans *Optics and Spectroscopy*, 1990, **68**, 412-413].

LPI Pas de réponse.

VNIIFTRI Pas de réponse.

NIM Le NIM a mesuré les rapports de fréquences entre des lasers à He-Ne asservis à 3,39 μm et à 633 nm. Les rapports de fréquences $R(i)$ et $R(f)$ entre les composantes i et f de la transition $R(127) 11-5$ du système B-X de $^{127}\text{I}_2$ et la composante $F_2^{(2)}$ de la transition $\nu_3 P(7)$ du laser à CH_4 sont les suivants :

$$R_{(i)} = 5,359048177, \text{ avec une incertitude de } 2,3 \times 10^{-9},$$

$$R_{(f)} = 5,359049762, \text{ avec une incertitude de } 2,3 \times 10^{-9},$$

(document CCDM/92-10-1j).

NIST Pas de réponse.

NPL Le NPL a mesuré cinq séries de rapports de fréquences :

1. laser à He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ à $\lambda = 543 \text{ nm}$ (composantes b_{10} et b_{15} de $R(106) 28-0$) et laser à He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ à $\lambda = 633 \text{ nm}$ (composante i de $R(127) 11-5$) :

$$f_{b_{10}}(0^\circ\text{C})/f_i = 1,16462402192,$$

$$f_{b_{15}}(0^\circ\text{C})/f_i = 1,16462462862.$$

L'incertitude-type relative de chaque rapport de fréquences est de $1,2 \times 10^{-10}$ (document CCDM/92-12a);

2. laser à colorant/ $^{127}\text{I}_2$ à $\lambda = 576 \text{ nm}$ (composante o de P(62) 17-1). Le résultat ne diffère que de 3×10^{-11} de celui donné dans la mise en pratique;
3. laser à He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ à $\lambda = 640 \text{ nm}$ (composante g de P(1) 8-5) :
 $f_g/f_i = 0,988\,611\,184\,191$.
 L'incertitude relative du rapport est de 1×10^{-10} ;
4. diode laser asservie sur Rb à $\lambda = 780 \text{ nm}$ et $\lambda = 795 \text{ nm}$;
5. composantes hyperfines du tellure moléculaire (Te_2) au voisinage de 486 nm .
 (documents CCDM/92-12c, d, e, f, et g).

NRLM

Les rapports de fréquences mesurés donnent une valeur de la raie d'absorption du calcium de :

$$f = (455\,986\,240,28 \pm 0,46) \text{ MHz.}$$

Les mesures de rapport de fréquences entre un laser à He-Ne asservi sur le Lamb dip à $1,52 \text{ }\mu\text{m}$ et un laser à He-Ne asservi sur l'iode à 633 nm donnent les fréquences pour ^{20}Ne et ^{22}Ne . [SASADA H., KUBOTA O., Frequency of Lamb-Dip-Stabilized $1.52 \text{ }\mu\text{m}$ He-Ne Lasers, *Appl. Phys.*, 1992, **B55**, 186-188].

PTB

Quatre séries de mesures de rapport de fréquences ont été faites en utilisant un laser à He-Ne asservi sur l'iode à $\lambda = 633 \text{ nm}$ et un laser à Ar^+ asservi sur l'iode à $\lambda = 515 \text{ nm}$ comme lasers de référence. Les résultats suivants et leurs incertitudes-types relatives sont donnés dans le document CCDM/92-14a.

1. Pour le laser à ^{40}Ca à colorant à $\lambda = 657 \text{ nm}$ (raie $^3\text{P}_1 - ^1\text{S}_0$) :
 $\lambda_{657}/\lambda_{633,i} = 1,038\,654\,618\,63 (1 \pm 7 \times 10^{-11})$,
 $\lambda_{515a_3}/\lambda_{657} = 0,782\,821\,624\,59 (1 \pm 5 \times 10^{-11})$,
 $\lambda_{515a_3}/\lambda_{633,i} = 0,813\,081\,295\,94 (1 \pm 7 \times 10^{-11})$;
2. Pour le laser à He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ à $\lambda = 543 \text{ nm}$ (composante a₉ de R(12) 26-0) :
 $\lambda_{543a_9}/\lambda_{633,i} = 0,858\,647\,265\,30 (1 \pm 8 \times 10^{-11})$,
 $\lambda_{543a_9}/\lambda_{515a_3} = 1,056\,041\,099\,06 (1 \pm 6 \times 10^{-11})$;
3. Pour le laser à He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ à $\lambda = 640 \text{ nm}$ (composante a₉ de P(10) 8-5) :
 $\lambda_{515a_3}/\lambda_{640a_9} = 0,803\,821\,262\,49 (1 \pm 11 \times 10^{-11})$,
 $\lambda_{633i}/\lambda_{640a_9} = 0,988\,611\,183\,86 (1 \pm 12 \times 10^{-11})$;

4. Pour le laser à He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ à $\lambda = 612$ nm (composante b_{15} de P(48) 11-3) :

$$\lambda_{515a_3}/\lambda_{612b_{15}} = 0,841\,009\,609\,10 \ (1 \pm 7 \times 10^{-11}),$$

$$\lambda_{612b_{15}}/\lambda_{633,i} = 0,966\,791\,921\,43 \ (1 \pm 8 \times 10^{-11}),$$

$$\lambda_{515a_3}/\lambda_{633,i} = 0,813\,081\,295\,92 \ (1 \pm 8 \times 10^{-11}).$$

Les incertitudes-types relatives des rapports de longueurs d'onde mesurés sont de l'ordre de quelques 10^{-11} ; elles approchent l'incertitude due au défaut de reproductibilité de fréquence d'un laser à He-Ne asservi sur I_2 à $\lambda = 633$ nm, laquelle est inférieure de plus d'un ordre de grandeur à l'incertitude de la valeur de sa longueur d'onde recommandée. Une mesure de fréquence précise de l'une quelconque des six fréquences considérées améliorerait donc aussi l'incertitude de toutes les autres fréquences.

CSMU Non.

CSIR Non.

OFMET Non.

DSIR Non.

INM Des mesures faites à l'INM donnent :
pour un laser à He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ à $\lambda = 612$ nm :
 $f_{a_7} = (489\,880\,354\,939 \pm 88)$ kHz ;
pour un laser à He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ à $\lambda = 543$ nm, les résultats sont donnés dans les documents CCDM/92-19*a*, *h*, et *i*.

BIPM Le BIPM a fait trois séries de mesures :
1. comparaison de lasers à He-Ne à 612 nm, 633 nm et 515 nm à la PTB ;
2. comparaison de lasers à He-Ne à 612 nm, 640 nm et 633 nm avec l'IMGC ;
3. lasers à He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ à $\lambda = 543$ nm (composante a_{12} de R(12) 26-0) :
 $\lambda_{a_{13}} = 543\,516\,085$ fm, avec une incertitude-type de 4 fm.

Tous ces résultats sont donnés dans le document CCDM/92-20*a*.

KRISS Non.

IPL Pas de réponse.

JILA Expériences en cours sur la synthèse de fréquence fondées sur la stratégie de Hänsch « diviser pour régner ». La fréquence d'un laser au Nd stable ($\lambda = 1,064 \mu\text{m}$) et sa fréquence doublée, asservie sur une raie de l'iode, sont additionnées dans un cristal de LiO_3 . La fréquence somme est égale au double de la fréquence d'un laser à saphir au titane ($\lambda = 709 \text{ nm}$) qu'elle permet d'asservir. Il est prévu ensuite d'asservir une diode laser ($\lambda = 851 \text{ nm}$) sur la fréquence médiane de $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$ et $\lambda = 709 \text{ nm}$. Les trois longueurs d'onde ainsi asservies sont dans des rapports simples et devraient permettre de déceler les erreurs systématiques éventuelles dans les mesures de longueur d'onde (lambdamètre).

2.2 Envisagez-vous de mesurer le rapport de fréquences ? Dans l'affirmative, décrivez brièvement l'instrument que vous pensez utiliser et l'incertitude que vous espérez obtenir.

NRC Aucune mesure de rapport de fréquence n'est prévue.

CSIRO Pas d'activité dans ce domaine.

IMGC Pas pour le moment.

VNIIM Des mesures de rapport de fréquences sont envisagées entre 633 nm et 3,39 μm , entre 633 nm et 543 nm et entre 633 nm et 640 nm au moyen d'interféromètres Fabry-Perot dont la longueur peut aller jusqu'à 1800 mm et de techniques hétérodynes. Les incertitudes visées sont de 2×10^{-10} (infrarouge/visible) et de 8×10^{-11} (visible/visible).

LPI Pas de réponse.

VNIIFTRI Pas de réponse.

NIM Pas de réponse.

NIST Pas de réponse.

NPL Pas de réponse.

NRLM Le NRLM projette de mesurer les rapports de fréquences décrits en 2.1.

PTB Pas de réponse.

CSMU Pas de réponse.

CSIR	Non.
OFMET	Non.
DSIR	Oui, l'instrument n'a pas encore été choisi.
INM	Pas de réponse.
BIPM	Le BIPM envisage une mesure plus précise de la longueur d'onde de quelques composantes d'un laser à He-Ne à $\lambda = 543$ nm.
KRISS	Non.
IPL	Pas de réponse.
JILA	Pas de réponse.

3. Mise en pratique de la définition du mètre

3.1 Avez-vous des propositions à formuler pour changer des valeurs de fréquences, longueurs d'onde ou incertitudes données dans la mise en pratique de la définition du mètre ? Dans l'affirmative, décrivez-les brièvement.

NRC	<p>La valeur recommandée pour la composante $F_2^{(2)}$ de la transition ν_3 de la bande P(7) de la molécule CH_4 et son écart-type seraient à changer. La valeur de la fréquence recommandée par le BIPM, 88 376 181 608 kHz, est supérieure d'environ 7 kHz à la moyenne des mesures. La valeur recommandée de la longueur d'onde doit être aussi corrigée. Les nouvelles valeurs obtenues au NRC, et certaines des valeurs obtenues dans d'autres laboratoires sont données dans le document CCDM/92-4a (Annexe A).</p> <p>Le changement de la valeur recommandée par le BIPM pour la fréquence à 474 THz, qui est à présent fondée sur la connaissance que nous avons de la fréquence à 88 THz, n'est probablement pas justifié, car l'incertitude n'en serait que fort peu améliorée.</p>
CSIRO	Aucune proposition.
IMGC	La valeur recommandée pour la radiation à 612 nm est actuellement fondée sur la composante a_7 de la transition

R(47) 9-2 de $^{127}\text{I}_2$. Deux transitions différentes sont utilisées à l'IMGC comme références de fréquence :
P(48) 11-3, reproductibilité meilleure que 10 kHz ;
R(34) 17-6, composante e_{15} .
(documents CCDDM/92-6*k* et *c*).

VNIIM	L'incertitude relative estimée pour la radiation émise par un laser asservi sur l'absorption saturée dans de la vapeur d'iode (composante i de la transition R(127) 11-5) peut être réduite au moins jusqu'à $\pm 3 \times 10^{-10}$ en suivant les conditions données au point 1.3 de la Recommandation 1 (CI-1983).
LPI	Pas de réponse.
VNIIFTRI	Pas de réponse.
NIM	Pas de réponse.
NIST	Pas de réponse.
NPL	Voir note de B. W. Petley (document CCDDM/92-12 <i>b</i>).
NRLM	Le NRLM n'a pas de proposition à faire.
PTB	La fréquence d'un laser à He-Ne/CH ₄ (88 THz) asservi a été mesurée par différents groupes avec une structure hyperfine résolue ou non résolue. La PTB propose d'ajuster cette valeur sur les mesures récentes et de diminuer l'incertitude. Pour les lasers simples, il est conseillé de préciser les conditions de fonctionnement avec les valeurs des longueurs d'onde et des incertitudes plus grandes.
CSMU	Le CSMU n'a pas de proposition à faire.
CSIR	Le CSIR n'a pas de proposition à faire.
OFMET	L'OFMET n'a pas de proposition à faire.
DSIR	Le DSIR n'a pas de proposition à faire.
INM	L'INM propose une nouvelle valeur de la fréquence d'un laser à He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ asservi à $\lambda = 633 \text{ nm}$ (composante f de la transition R(127) 11-5) (document CCDDM/92-19 <i>a</i>).
BIPM	Le BIPM propose un ajustement des valeurs de la fréquence d'un laser à He-Ne/CH ₄ asservi à $\lambda = 3,39 \text{ }\mu\text{m}$ à proximité

de :

$f = 88\,376\,181\,600$ kHz;
et d'un laser à He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ asservi à $\lambda = 633$ nm à proximité
de :

$f_t = 473\,612\,353\,597$ kHz, avec une incertitude-type de
11 kHz,
ou de $f_i = 473\,612\,214\,705$ kHz, avec une incertitude-type de
11 kHz.

Voir document CCDDM/92-20a pour les propositions du BIPM
concernant les intervalles de fréquence entre les différentes
composantes (Tableaux 5 à 14).

KRISS Le KRISS n'a pas de proposition à faire.

IPL Pas de réponse.

JILA Pas de réponse.

3.2 Proposez-vous d'inclure des radiations supplémentaires dans la mise
en pratique ? Dans l'affirmative, donnez brièvement vos arguments en
faveur de ces nouvelles radiations.

NRC Le NRC ne propose pas d'inclure des radiations
supplémentaires dans la mise en pratique.

CSIRO Des diodes laser à 780 nm, 795 nm et 850 nm sont
actuellement utilisées pour l'étalonnage des calibres et des
étalons à bouts. Le CSIRO se fonde à présent sur les valeurs
publiées des longueurs d'ondes de lasers asservis sur Rb,
 H_2O ou Cs. Pour ces diodes et pour d'autres, il serait utile de
pouvoir s'appuyer sur des mesures directes de fréquence.

IMGC D'autres radiations dans le visible seraient utiles pour élargir
le choix de sources laser et permettre d'utiliser la longueur
d'onde la mieux appropriée à une application particulière.
Deux radiations ont été étudiées ces dernières années :
lasers à $^3\text{He}-^{22}\text{Ne}/^{127}\text{I}_2$ à $\lambda = 640$ nm, transition P(10) 8-5 ;
lasers à He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ à $\lambda = 543$ nm, transitions R(12) 26-0 et
R(106) 28-0.

VNIIM Pas de réponse.

LPI Pas de réponse.

VNIIFTRI Pas de réponse.

NIM	<p>Le NIM suggère d'utiliser la radiation du laser à $^3\text{He-}^{22}\text{Ne}$ à 640 nm asservi sur $^{127}\text{I}_2$ pour réaliser la définition du mètre. La composante a_9 de la transition P(10) 8-5 de $^{127}\text{I}_2$ a été choisie comme fréquence de référence, parce qu'elle est bien isolée des autres composantes susceptibles de la perturber.</p>
NIST	<p>Pas de réponse.</p>
NPL	<p>La radiation que le NPL juge la mieux appropriée pour figurer dans la liste future des radiations recommandées est celle d'un laser à He-Ne/I_2 à 543 nm (551 THz). Elle est commode, et elle est utilisée de façon courante pour l'étalonnage de lasers bimodes asservis par égalisation d'intensité des deux modes, lasers qui sont à leur tour utilisés pour mesurer la longueur des calibres.</p> <p>Le laser à He-Ne/I_2 à 640 nm pourrait aussi servir d'étalon. Les raies du rubidium (780 nm, 795 nm) sont intéressantes, mais l'utilité de leur adoption comme étalons n'est pas évidente.</p>
NRLM	<p>Le NRLM propose d'ajouter la radiation du laser à colorant asservi sur le calcium comme nouvelle radiation recommandée. Des valeurs préliminaires donnent une stabilité de fréquence de 2×10^{-13} sur 100 s et une reproductibilité de 6×10^{-12}. Ces valeurs sont appelées à être améliorées.</p> <p>(documents CCDM/92-13e, f, et g).</p>
PTB	<p>La PTB propose d'introduire dans la mise en pratique les radiations d'un laser asservi sur le calcium à $\lambda = 657$ nm, et celle de deux lasers à He-Ne asservis sur l'iode à $\lambda = 543$ nm et à $\lambda = 640$ nm. Les longueurs d'onde de ces radiations ont été mesurées à la PTB (document CCDM/92-14a).</p>
CSMU	<p>Le CSMU propose, en accord avec le NIM (Beijing), d'ajouter à la liste des radiations recommandées la transition P(10) 8-5 de $^{127}\text{I}_2$. D'après les résultats expérimentaux, cette transition s'est révélée fort utile pour l'asservissement de lasers à He-^{22}Ne à $\lambda = 640$ nm.</p>
CSIR	<p>Non.</p>
OFMET	<p>L'OFMET propose la radiation du laser à He-Ne/I_2 à $\lambda = 543$ nm, transitions R(12) 26-0 et R(106) 28-0. La radiation verte du laser à He-Ne est utilisée de plus en plus souvent en métrologie, en particulier en interférométrie à deux longueurs d'onde.</p>

DSIR	Non.
INM	L'INM propose la transition P(33) 6-3 de $^{127}\text{I}_2$ à $\lambda = 633 \text{ nm}$.
BIPM	Le BIPM propose d'inclure la radiation des lasers à He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ asservis à $\lambda = 543 \text{ nm}$ et des lasers à CO_2/OsO_4 asservis à $\lambda = 10,6 \text{ }\mu\text{m}$.
KRISS	Non.
IPL	Pas de réponse.
JILA	La région verte du spectre autour de 534 nm offrira une fréquence optique de référence supplémentaire, ayant les propriétés avantageuses suivantes: le laser à Nd pompé par diodes peut être très simple et stable, et le deuxième harmonique, dans le vert, s'obtient facilement avec une puissance qui peut atteindre quelques milliwatts.
3.3 Proposez-vous de modifier les conditions de fonctionnement de lasers mentionnées dans la mise en pratique, avec une grande exactitude, de la définition du mètre ? Est-il pour cela nécessaire d'inclure des conditions relatives à des paramètres supplémentaires ?	
NRC	Le NRC n'a pas de proposition à faire concernant la modification des conditions de fonctionnement.
CSIRO	Non.
IMGC	Pour les lasers à 633 nm, les conditions de fonctionnement recommandées actuellement conviennent jusqu'à une incertitude de $3,4 \times 10^{-10}$, mais elles ne permettent pas d'assurer une reproductibilité de 20 kHz.
VNIIM	Pas de réponse.
LPI	Pas de réponse.
VNIIFTRI	Pas de réponse.
NIM	Le NIM suggère que le CCDM recommande un modèle, comparable à celui qui est actuellement utilisé par les laboratoires nationaux, pour le laser à He-Ne asservi sur l'iode.

NIST	Pas de réponse.
NPL	<p>Les résultats ont montré que le décalage, en fonction de la puissance, des lasers asservis sur l'iode à 633 nm dépend de paramètres qui ne sont pas mentionnés dans la mise en pratique. Il semble que ces paramètres ne sont pas suffisamment bien compris pour que l'on puisse les inclure dans les conditions de fonctionnement. L'accord entre les laboratoires est meilleur pour des puissances inférieures à celles qui sont actuellement spécifiées.</p> <p>Le NPL propose de limiter les conditions de fonctionnement relatives à la puissance transportée par le faisceau à l'intérieur de la cavité, dans un seul sens, à $7 \text{ mW} \pm 3 \text{ mW}$ au lieu de $20 \text{ mW} \pm 5 \text{ mW}$.</p>
NRLM	Le NRLM approuve la proposition de modifier les conditions de fonctionnement de la cuve d'absorption du laser à He-Ne asservi sur l'iode à $\lambda = 633 \text{ nm}$.
PTB	Pas de réponse.
CSMU	Le CSMU n'a pas de proposition à faire.
CSIR	Le CSIR n'a pas de proposition à faire.
OFMET	L'OFMET n'a pas de proposition à faire.
DSIR	Le DSIR n'a pas de proposition à faire.
INM	Pas de réponse.
BIPM	<p>Le BIPM a fait six propositions.</p> <p>Pour le laser à He-Ne/CH₄ à $\lambda = 3,39 \text{ }\mu\text{m}$, il propose :</p> <ol style="list-style-type: none">1. que le photorécepteur de l'asservissement soit placé du côté du tube à décharge du résonateur ;2. que le diamètre du capillaire du tube laser soit supérieur à cinq fois le diamètre du faisceau (2 w) ;3. que les pertes situées à l'intérieur de la cavité soient minimisées. <p>Pour le laser à He-Ne/¹²⁷I₂ à $\lambda = 633 \text{ nm}$, il propose :</p> <ol style="list-style-type: none">4. que la puissance à l'intérieur de la cavité dans un seul sens soit $(7 \pm 3) \text{ mW}$ (aussi proposé par le NPL) ;5. que la modulation de fréquence, de crête à creux, soit $(6 \pm 0,2) \text{ MHz}$;

6. que la température du point froid de la cuve à iode soit $(15 \pm 0,1) ^\circ\text{C}$.

KRISS Il faudrait spécifier la tension continue parasite tolérable à la sortie du détecteur de phase, dans l'asservissement.

IPL Pas de réponse.

JILA Pas de réponse.

3.4 Quelles sont les radiations et fréquences recommandées dans la mise en pratique que vous utilisez dans votre laboratoire pour la réalisation de la définition du mètre et quelle est votre estimation des incertitudes de réalisation ?

NRC Les radiations recommandées utilisées au NRC, avec leur incertitude relative correspondant à trois fois l'écart-type, sont les suivantes :

1. lasers :
 $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ (88,4 THz); $\pm 3,6 \times 10^{-12}$,
 $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz); $\pm 1,0 \times 10^{-9}$,
 $\lambda = 576 \text{ nm}$ (520 THz); $\pm 1,0 \times 10^{-9}$;
2. lampes spectrales :
 ^{86}Kr ; $\pm 1,4 \times 10^{-8}$,
 ^{198}Hg ; $\pm 3,0 \times 10^{-8}$,
 ^{114}Cd ; $\pm 6,0 \times 10^{-8}$.

CSIRO Les radiations recommandées utilisées au CSIRO sont les suivantes :
 $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz), avec une incertitude de 1×10^{-10} ;
 $\lambda = 612 \text{ nm}$ (490 THz);
radiations spectrales : ^{86}Kr , ^{198}Hg , ^{114}Cd , selon les directives du CIPM.

IMGC Les radiations recommandées (ou non recommandées) utilisées à l'IMGC sont les suivantes :

1. en permanence :
 $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz), avec une incertitude-type relative estimée de $3,4 \times 10^{-10}$,
 $\lambda = 612 \text{ nm}$ (490 THz)/ $^{127}\text{I}_2$ P(48) 11-3, avec une incertitude-type relative estimée de $3,7 \times 10^{-10}$;
2. dans un délai de un jour à une semaine :
 $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ (88 THz), avec une incertitude globale relative estimée de $1,3 \times 10^{-10}$,

$\lambda = 640 \text{ nm}$ (467 THz)/ $^{127}\text{I}_2$ P(10) 8-5, avec une incertitude-type relative estimée de $5,7 \times 10^{-10}$,
 $\lambda = 612 \text{ nm}$ (490 THz)/ $^{127}\text{I}_2$ R(34) 17-6 ou R(47) 9-2, avec une incertitude-type relative estimée de $3,7 \times 10^{-10}$,
 $\lambda = 605 \text{ nm}$ (494 THz)/ $^{127}\text{I}_2$ P(62) 11-2,
lasers à CO_2 , asservis sur le CO_2 , avec une incertitude globale relative estimée de 1×10^{-9} ,
lasers à CO_2 asservis sur OsO_4 , avec une incertitude globale relative estimée de 1×10^{-10} ;

3. lasers utilisés à titre expérimental :
He-Ne à 543 nm — spectroscopie en modulation de fréquence,
He-Ne à 514 nm — spectroscopie en modulation de fréquence,
diode laser à 1,5 μm — spectroscopie en modulation de fréquence,
laser à CO_2 — faisceau thermo-moléculaire de OsO_4 .

VNIIM Les radiations recommandées (ou non recommandées) utilisées au VNIIM sont les suivantes :
 $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz), avec une incertitude globale relative de 3×10^{-10} ;
 $\lambda = 612 \text{ nm}$ (490 THz), avec une incertitude globale relative de $3,5 \times 10^{-10}$;
 $\lambda = 640 \text{ nm}$.

LPI Pas de réponse.

VNIIFTRI Pas de réponse.

NIM Les radiations recommandées (ou non recommandées) utilisées au NIM sont les suivantes :
 $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ (88 THz), avec une incertitude globale relative de $1,3 \times 10^{-10}$;
 $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz), avec une incertitude globale relative de $1,0 \times 10^{-9}$;
 $\lambda = 612 \text{ nm}$ (490 THz), avec une incertitude globale relative de $1,1 \times 10^{-9}$;
 $\lambda = 515 \text{ nm}$ (582 THz), avec une incertitude globale relative de $1,3 \times 10^{-9}$;
 $\lambda = 576 \text{ nm}$, à l'étude;
 $\lambda = 640 \text{ nm}$ (467 THz), avec une incertitude-type relative de $3,6 \times 10^{-10}$.

NIST	Le NIST utilise la fréquence de référence recommandée à $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz) avec une incertitude-type relative estimée à $3,4 \times 10^{-10}$.
NPL	Les radiations recommandées utilisées au NPL sont les suivantes : $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz), avec une incertitude-type de la reproductibilité de 5 kHz (1×10^{-11} en valeur relative); éventuellement $\lambda = 612 \text{ nm}$ (490 THz), 576 nm (519 THz) et 515 nm (582 THz), mais pas de façon régulière.
NRLM	Les radiations recommandées utilisées au NRLM sont les suivantes : $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz); $\lambda = 612 \text{ nm}$ (490 THz); $\lambda = 3,39 \text{ }\mu\text{m}$ (88 THz).
PTB	Les radiations recommandées (ou non recommandées) utilisées à la PTB sont les suivantes : $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz); $\lambda = 612 \text{ nm}$ (490 THz); $\lambda = 3,39 \text{ }\mu\text{m}$ (88 THz); $\lambda = 515 \text{ nm}$ (582 THz); $\lambda = 543 \text{ nm}$ (552 THz); $\lambda = 657 \text{ nm}$ (456 THz).
CSMU	Radiation recommandée à $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz). Pour l'incertitude, voir document CCDM/92-15a.
CSIR	Radiation recommandée à $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz), avec une incertitude meilleure que 5×10^{-11} , d'après les récentes comparaisons avec le BIPM.
OFMET	Radiation recommandée à $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz). La différence de la fréquence par rapport à celle du laser BIPM est en moyenne de 2,7 kHz avec une incertitude-type de 1,8 kHz.
DSIR	Radiation recommandée à $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz). La valeur obtenue est en accord avec celle des autres lasers participant aux comparaisons internationales à $\pm 40 \text{ kHz}$ près.
INM	Les radiations recommandées utilisées à l'INM sont les suivantes : $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz); $\lambda = 612 \text{ nm}$ (490 THz);

$\lambda = 576 \text{ nm}$ (520 THz), laser à colorant.

BIPM Les radiations recommandées utilisées au BIPM sont les suivantes :

- $\lambda = 3,39 \text{ }\mu\text{m}$ (88 THz), avec une incertitude-type de 1 kHz (1×10^{-11} en valeur relative);
- $\lambda = 515 \text{ nm}$ (582 THz);
- $\lambda = 543 \text{ nm}$ (552 THz), avec une incertitude-type de 15 kHz (3×10^{-11} en valeur relative);
- $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz), avec une incertitude-type de 10 kHz (2×10^{-11} en valeur relative);
- $\lambda = 612 \text{ nm}$ (490 THz); incertitudes : cuve à l'intérieur du laser, incertitude-type de quelques 10^{-10} , cuve à l'extérieur du laser, incertitude-type inférieure à 5 kHz ($< 1 \times 10^{-11}$ en valeur relative).

KRISS La radiation recommandée utilisée par le KRISS est la suivante :

- $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz) avec une incertitude de 4,9 kHz (1×10^{-11} en valeur relative).

IPL Les radiations recommandées utilisées par l'IPL sont les suivantes :

- $\lambda = 515 \text{ nm}$ (582 THz);
- $\lambda = 3,39 \text{ }\mu\text{m}$ (88 THz);
- $\lambda = 10,6 \text{ }\mu\text{m}$ (29 THz).

JILA Les radiations recommandées utilisées par le JILA sont les suivantes :

- $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz);
- $\lambda = 612 \text{ nm}$ (490 THz);

avec une cuve à iode respectivement à l'intérieur et à l'extérieur du laser.

3.5 Avez-vous étudié ou étudiez-vous actuellement de nouvelles méthodes qui pourraient améliorer la reproductibilité de fréquence des radiations recommandées pour la définition du mètre ou d'autres radiations ? Dans l'affirmative, décrivez brièvement ces méthodes et l'avancement des travaux.

NRC Travaux en cours pour la réalisation d'étalons de fréquence et de longueur d'onde fondés sur des ions isolés et piégés :

1. Le travail sur le Ba^+ (24 THz) est bien avancé, et des mesures de grande exactitude de la fréquence sont prévues pour l'été de 1992;

2. Le travail sur les ions Sr^+ est appelé à prendre de l'importance en métrologie des longueurs en raison des fréquences d'horloge dans le visible à proximité de celle du laser à He-Ne/ I_2 à 474 THz. Le travail n'est pas aussi avancé. Nous espérons que les ions pourront être piégés et refroidis au cours de l'année 1993.

CSIRO Pas de proposition.

IMGC Deux nouvelles méthodes sont en cours de réalisation à l'IMGC :

1. laser à CO_2 asservi sur un faisceau thermo-moléculaire (document CCDDM/92-6m).
2. la spectroscopie FM (modulation de fréquence ou de phase), largement utilisée à l'IMGC.

VNIIM Le VNIIM travaille sur cinq projets :

1. les lasers asservis sur l'iode à $\lambda = 633 \text{ nm}$ avec modulation à une fréquence supérieure ;
2. la mise au point d'un laser transportable à He-Ne/ I_2 ;
3. l'amélioration des lasers à He-Ne/ I_2 à $\lambda = 640 \text{ nm}$;
4. la mise au point d'un laser à He-Ne/ I_2 à $\lambda = 543 \text{ nm}$;
5. l'étude d'un nouveau type de résonances très étroites dans le spectre de systèmes à deux ou trois niveaux dans un champ intense de laser polyharmonique et l'étude de leur utilisation éventuelle pour l'asservissement en fréquence de lasers.

LPI Le LPI travaille sur quatre projets :

1. la mise au point d'une méthode bimodale de spectroscopie sous-Doppler permettant d'enregistrer des résonances étroites en dispersion saturée avec un meilleur rapport signal sur bruit et de réduire les effets de décalage systématique caractéristiques de la spectroscopie sous-Doppler (comme par exemple l'effet de lentille gazeuse) ;
2. la mise au point des lasers à He-Ne asservis sur le méthane à 88 THz d'après la méthode décrite ci-dessus. La reproductibilité de la fréquence des lasers bimodes transportables à He-Ne/ CH_4 peut être estimée à 3×10^{-13} ;

3. des comparaisons et des recherches seront faites sur des lasers bimodes de 1992 à 1994. On espère obtenir une reproductibilité d'environ 3×10^{-14} ;
4. le travail sur des lasers à centre coloré asservis sur le méthane pourrait améliorer l'exactitude jusqu'à 1×10^{-15} . Ces travaux devraient être réalisés de 1992 à 2002.

VNIFTRI Pas de réponse.

NIM Pas de réponse.

NIST Le NIST/Boulder travaille sur plusieurs étalons potentiels de fréquence ou de longueur d'une exactitude supérieure aux étalons actuels : ions Hg, Ca à 657 nm, transitions du Sr et du Cs. Ces travaux, d'une durée de un à cinq ans, visent à améliorer les étalons de laboratoire de grande exactitude et les étalons transportables.

NPL Étude de nouveaux étalons de fréquence optiques fondés sur des ions isolés refroidis dans des pièges en radiofréquence.

NRLM Étude d'un laser à colorant asservi en fréquence à l'aide de la raie d'absorption d'atomes de Ca piégés et refroidis.

PTB Pas de réponse.

CSMU Le CSMU a mis au point des lasers à He-Ne asservis sur l'iode à l'aide du cinquième harmonique ; une incertitude-type relative de 1×10^{-11} a été obtenue. Le CSMU recommande d'accroître les efforts dans le domaine expérimental de cette technique, et d'effectuer des comparaisons internationales de ce type de lasers.
Il a mis au point une nouvelle technique pour la mesure de l'amplitude de la modulation de fréquence de lasers modulés en fréquence. Cette méthode simplifie les mesures et dispense d'utiliser des analyseurs spectraux à large bande, d'un coût élevé.
[ZIEGLER M., BALLING P., SMYDKE J., BLABLA J., *CPEM'92* (note brève)].
[BALLING P., ZIEGLER M., *Report CSMU-KM-24/92* (en anglais)].

CSIR Non.

OFMET Non.

DSIR	Non.
INM	Pas de réponse.
BIPM	Le BIPM a commencé l'étude de cuves externes à CH_4 dans un interféromètre de Fabry-Perot à $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ et de l'asservissement d'un laser à Ar^+ à 515 nm à l'aide de la technique de modulation de fréquence à bande latérale.
KRISS	Non.
IPL	L'IPL met au point de nouvelles méthodes en vue d'obtenir des résonances optiques très étroites avec une fréquence absolue de 1 Hz à 10 Hz et de mettre au point une nouvelle génération de lasers étalons de temps ou de fréquence avec une stabilité relative en fréquence, à long terme, et une reproductibilité relative de l'ordre de 10^{-16} à 10^{-17} pour les systèmes stationnaires et de 10^{-15} à 10^{-16} pour les étalons transportables.
JILA	Le JILA réalise, en collaboration avec le BIPM et l'East China Normal University, un système prometteur, à $\lambda = 612 \text{ nm}$, pour l'emploi de cuves d'absorption dans un résonateur externe en anneau.

4. Comparaisons internationales de fréquence de lasers

4.1 Quelles sont les comparaisons de fréquence de lasers auxquelles vous avez participé ? Précisez :

- a) les fréquences et longueurs d'onde,
- b) les laboratoires participants,
- c) les résultats ou la référence de la publication donnant les résultats.

NRC	<p>Le NRC a participé à trois comparaisons :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz), composantes d, e, f, g, h, i et j; entre le NRC (Canada) et le NML/CSIRO (Australie), mars 1984 : $f_{\text{NRC}} - f_{\text{NML}} = -38,1 \text{ kHz}$ (8×10^{-11}). (document CCDM/92-18b); 2. $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ (88 THz), composante $F_2^{(2)}$, transition ν_3, bande P(7); entre le NRC (Canada) et le VNIIFTRI (ex-URSS), novembre-décembre 1988.
-----	---

Résultats obtenus avec le laser portable M 101 :

$f = (88\,376\,181\,601,48 \pm 0,1)$ kHz ; chaîne de fréquence du VNIIFTRI,
 $f = (88\,376\,181\,601,29 \pm 0,1)$ kHz ; chaîne de fréquence du NRC,
 $f = (88\,376\,181\,601,46 \pm 0,1)$ kHz ; chaîne de fréquence du VNIIFTRI ;

3. $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ (88 THz), composante $F_2^{(2)}$, transition ν_3 , bande P(7) ; entre le NRC (Canada), le VNIIFTRI (ex-URSS) et le BIPM, décembre 1988.

Résultats obtenus avec le laser BIPM VB, avec une amplitude de modulation de 200 kHz :

$f = (88\,376\,181\,603,98 \pm 0,2)$ kHz par rapport au laser M101 (chaîne de fréquence du VNIIFTRI),
 $f = (88\,376\,181\,603,29 \pm 1,0)$ kHz par rapport à l'horloge CsV du NRC (chaîne de fréquence du NRC).

CSIRO Le CSIRO a participé à quatre comparaisons :

1. $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz), composantes d, e, f, g, h, i et j ; entre le CSIRO (Australie) et le PEL (Nouvelle-Zélande), mai 1984.

(document CCDM/92-18b) ;

2. $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz) ; entre le CSIRO (Australie) et le NPL (Royaume-Uni). Vérification de cuves à iode par effet Hanle, juin 1985 : aucune contamination ;
3. $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz), composantes d, e, f et g ; entre le CSIRO (Australie) et le NRLM (Japon), décembre 1989 :
 $f_{\text{NRLM (NN-6)}} - f_{\text{CSIRO}} = 3,2 \text{ kHz}$, avec une incertitude-type de 2,1 kHz ;
4. $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz), composantes d, e, f et g ; entre le CSIRO (Australie) et le BIPM, 1991. Vérification de cuves à iode :
 $f_{\text{CSIRO-1}} - f_{\text{BIPM}} = 1,6 \text{ kHz}$, avec une incertitude-type de 2,7 kHz.

IMGC

L'IMGC a pris part, en juin 1991, à une comparaison avec le LMM (Espagne) à $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz), composantes d, e, f, g et h :

$a_{15} : f_{\text{LMM}} - f_{\text{IMGC}} = (-0,31 \pm 1,74) \text{ kHz}$;
 $a_{16} : f_{\text{LMM}} - f_{\text{IMGC}} = (-0,40 \pm 0,44) \text{ kHz}$;
 $a_{17} : f_{\text{LMM}} - f_{\text{IMGC}} = (-3,30 \pm 1,39) \text{ kHz}$;
 $a_{18} : f_{\text{LMM}} - f_{\text{IMGC}} = (-14,68 \pm 1,77) \text{ kHz}$.

- VNIIM Le VNIIM a participé à deux comparaisons :
1. $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz); à Bratislava, septembre 1988 :
 $f_{\text{VNIIM (L1)}} - f_{\text{BIPM4}} = (8,8 \pm 12) \text{ kHz}$
[Metrologia, 1991, 28, 19-25];
 2. $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz); à Helsinki, janvier 1991 :
 $f_{\text{VNIIM (L1)}} - f_{\text{TTK}} = (2,8 \pm 3,4) \text{ kHz}.$
- LPI Pas de réponse.
- VNIIFTRI Pas de réponse.
- NIM Le NIM a participé à quatre comparaisons :
1. $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz), composantes d, e, f et g; comparaison internationale, avril 1984.
(document CCDM/92-18b);
 2. $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz), composantes d, e, f, g et h; entre le NIM (Rép. pop. de Chine) et la PTB (Allemagne), juillet 1988 :
 $f_{\text{NIM (1)}} - f_{\text{PTB}} = (1,77 \pm 1,07) \text{ kHz},$
 $f_{\text{NIM (2)}} - f_{\text{PTB}} = (-4,97 \pm 1,17) \text{ kHz};$
 3. $\lambda = 612 \text{ nm}$ (490 THz), composantes k, l, m, n, o, p, q, r et s; entre le NIM (Rép. pop. de Chine) et la PTB (Allemagne), mai 1990 : l'écart-type relatif entre 25 groupes de mesures, chaque mesure durant 10 secondes, était meilleur que $4,2 \times 10^{-12}$ (document CCDM/92-10a);
 4. comparaison internationale de cuves d'absorption de $^{127}\text{I}_2$ organisée par le BIPM.
- NIST Le NIST a participé à une comparaison internationale à $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz).
(document CCDM/92-18b).
- NPL Le NPL a participé à une comparaison internationale à $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz).
(document CCDM/92-18b).
- NRLM Le NRLM a participé à cinq comparaisons internationales :
1. comparaison internationale de cuves d'absorption de $^{127}\text{I}_2$ organisée par le BIPM, 1990;
 2. $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz); entre le NRLM (Japon) et le BIPM, 1988 :
 $f_{\text{NRLM}} - f_{\text{BIPM}} = (0,9 \pm 2,6) \text{ kHz};$

3. $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz); entre le NRLM (Japon) et le CSIRO (Australie), 1986 :
 $f_{\text{NRLM}} - f_{\text{CSIRO}} = (3,16 \pm 2,1) \text{ kHz}$.
(document CCDDM/92-18b);
4. $\lambda = 3,39 \text{ }\mu\text{m}$ (88 THz); entre le NRLM (Japon) et le BIPM, 1988 :
 $f_{\text{NRLM}} - f_{\text{BIPM}} = (-4,21 \pm 0,23) \text{ kHz}$;
5. $\lambda = 3,39 \text{ }\mu\text{m}$ (88 THz); entre le NRLM (Japon) et le VNIIFTRI (ex-URSS), 1988 :
 $f_{\text{NRLM}} - f_{\text{VNIIFTRI}} = (-4,93 \pm 0,14) \text{ kHz}$.

PTB

La PTB a participé à six comparaisons :

1. $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz); comparaison internationale entre la PTB (Allemagne), le PEL (Nouvelle-Zélande), le NML/CSIRO (Australie), le NPLI (Inde), le NRC (Canada), le NBS (É.-U d'Amérique), le NIM (Rép. pop. de Chine), le NPL (Royaume-Uni), le NRLM (Japon) et le KSRI (Rép. de Corée), 1984.
(document CCDDM/92-18b);
2. $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz); entre la PTB (Allemagne) et l'UPT (Tchéco-Slovaquie), 1987.
(document CCDDM/92-14r);
3. $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz); entre l'ASMW (ex-Rép. dém. allemande) et le BIPM, le CSMU (Tchéco-Slovaquie), le CSAV (Tchéco-Slovaquie), l'OMH (Hongrie), le VNIIM (ex-URSS), 1988.
(document CCDDM/92-20q);
4. $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz); entre la PTB (Allemagne) et le BIPM, le SP (Suède), le DFM (Danemark), le MRI (Finlande), l'université d'Helsinki (Finlande) et l'université d'Århus (Danemark), 1990 :
 $f_{\text{PTB}} - f_{\text{BIPM}} < 10 \text{ kHz}$.
(document CCDDM/92-20y);
5. $\lambda = 3,39 \text{ }\mu\text{m}$ (88 THz); entre la PTB (Allemagne), le BIPM et le VNIIFTRI (ex-URSS), mai 1989. Les résultats ont été évalués par le BIPM;
6. $\lambda = 3,39 \text{ }\mu\text{m}$ (88 THz); entre la PTB (Allemagne) et l'Académie des sciences de Russie, novembre 1991 :
 - a) Institut de physique Lebedev, Moscou,
 - b) Institut de physique des lasers, Novosibirsk.

Les résultats du laboratoire *a*) ont été présentés par M.A. Gubin à la CPEM'92. Les résultats du laboratoire *b*) seront publiés ultérieurement.

CSMU

Le CSMU a participé à huit comparaisons :

1. $\lambda = 633$ nm (474 THz); entre le CSMU (Tchéco-Slovaquie) et l'ASMW (ex-Rép. dém. allemande), juin 1983 :

$$f_{\text{ASMW}} - f_{\text{CSMU}} = (-0,19 \pm 2,17) \text{ kHz};$$

2. $\lambda = 633$ nm (474 THz); entre le CSMU (Tchéco-Slovaquie) et le VNIIM (ex-URSS), août 1983 :

$$f_{\text{CSMU}} - f_{\text{VNIIM}} = (43 \pm 5) \text{ kHz};$$

3. $\lambda = 633$ nm (474 THz); entre le CSMU (Tchéco-Slovaquie) et le VNIIM (ex-URSS), décembre 1984 :

$$f_{\text{VNIIM}} - f_{\text{CSMU}} = (38,5 \pm 4,4) \text{ kHz};$$

4. $\lambda = 633$ nm (474 THz); comparaison internationale.
(document CCDDM/92-20*q*);

5. $\lambda = 633$ nm (474 THz); entre le CSMU (Tchéco-Slovaquie) et l'OMH (Hongrie), novembre 1989 :

$$f_{\text{CSMU}} - f_{\text{OMH}} = (13,2 \pm 2,4) \text{ kHz}.$$

Lasers asservis par d'autres méthodes :

6. $\lambda = 633$ nm (474 THz), comparaison de fréquence de lasers asservis sur le Lamb-dip entre le CSMU (Tchéco-Slovaquie) et l'INM (Roumanie), décembre 1985;

7. $\lambda = 633$ nm (474 THz), comparaison de fréquence de lasers asservis sur l'iode et sur deux modes orthogonaux entre le CSMU (Tchéco-Slovaquie) et le VNIIM (ex-URSS), décembre 1989.

8. comparaison de cuves à iode en coopération avec l'ASMW (ex-Rép. dém. allemande), 1989-1990 (document CCDDM/92-15*a*).

CSIR

Le CSIR (Afrique du Sud) a participé, avec le BIPM, à une comparaison à $\lambda = 633$ nm (474 THz).

(document CCDDM/92-20*a*).

OFMET

L'OFMET (Suisse) a participé, avec le BIPM, à une comparaison internationale à $\lambda = 633$ nm (474 THz), décembre 1991 :

$$f_{\text{OFMET}} - f_{\text{BIPM}} = 2,7 \text{ kHz, avec une incertitude-type de } 1,8 \text{ kHz,}$$

(document CCDDM/92-20*a*).

DSIR	Le DSIR a participé à une comparaison internationale à $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz), composantes d, e, f, g, h, i et j. (document CCDM/92-18b);
INM	Voir document CCDM/92-20a.
BIPM	Voir figure 1 (page M 99) et document CCDM/92-20a.
KRISS	Le KRISS a participé à deux comparaisons internationales : 1. En 1984, $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz). (document CCDM/92-18b); 2. En 1991, comparaison internationale (bilatérale) entre le KRISS et le BIPM : $f_{\text{KRISS}} - f_{\text{BIPM4}} = 6,7 \text{ kHz}$, avec une incertitude-type de 3,1 kHz, $n = 18$, (document CCDM/92-20a).
IPL	En 1991, les premières comparaisons d'échelles de fréquence entre l'IPL et la PTB ont été faites avec le laser transportable à He-Ne/CH ₄ ($\lambda = 3,39 \text{ }\mu\text{m}$) de l'IPL. Accord entre les deux chaînes de fréquence : 200 Hz.
JILA	Pas de réponse.
4.2 Quelles sont les comparaisons internationales de radiations et de fréquences auxquelles vous souhaiteriez participer à l'avenir ?	
NRC	Laser à He-Ne asservi sur l'iode à $\lambda = 633 \text{ nm}$ (474 THz), R(127), 11-5, composantes d, e, f, g, h, i et j.
CSIRO	Pas de réponse.
IMGC	L'IMGC pense que la récente comparaison de cuves à iode était utile. Il aimerait discuter des comparaisons avec d'autres laboratoires, et souligne l'importance des radiations de lasers à 633 nm et 543 nm ; à l'avenir, il faudra penser aux diodes laser asservies en fréquence.
VNIIM	Le VNIIM aimerait participer à des comparaisons de lasers à He-Ne asservis sur l'iode à $\lambda = 543 \text{ nm}$, 612 nm et 633 nm, ainsi qu'à des comparaisons de cuves à iode.
LPI	Comparaisons de lasers à He-Ne/CH ₄ . Le LPI aimerait comparer et mesurer la fréquence de son laser par rapport aux lasers de référence de chaînes de fréquence radio-optiques les plus précises, c'est-à-dire celles de la PTB (Allemagne), du NRC (Canada) et du LPTF (France).

VNIIFTRI	Pas de réponse.
NIM	Pas de réponse.
NIST	Pas de réponse.
NPL	Le NPL est intéressé par une comparaison de lasers à He-Ne dans le vert asservis sur l'iode à $\lambda = 543$ nm.
NRLM	Laser à CO ₂ ; cette radiation est importante dans la pratique courante.
PTB	Une comparaison bilatérale à $\lambda = 543$ nm est envisagée avec le BIPM. Une comparaison bilatérale de raies d'intercombinaison 1S_0 - 3P_1 du ^{40}Ca est envisagée avec le NRLM. Une comparaison bilatérale à $\lambda = 3,39$ μm est envisagée dans l'avenir avec l'Institut de physique des lasers, Novosibirsk.
CSMU	Le CSMU aimerait participer à des comparaisons de lasers à He-Ne asservis sur l'iode à $\lambda = 640$ nm, 633 nm, 612 nm et à 543 nm et de diodes laser dans le visible et dans l'infrarouge.
CSIR	Le CSIR n'envisage pas dans un proche avenir d'organiser de comparaisons internationales, mais il pourrait éventuellement participer à une comparaison organisée par un autre laboratoire.
OFMET	Pas de proposition.
DSIR	Pas de réponse.
INM	L'INM aimerait participer à des comparaisons internationales à $\lambda = 515$ nm, 612 nm et 543 nm.
BIPM	Pas de réponse.
KRISS	Le KRISS aimerait participer à une comparaison internationale de lasers à He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ à $\lambda = 612$ nm.
IPL	Pas de réponse.
JILA	Les raies d'intercombinaison du calcium à 657 nm sont très fines ; elles peuvent être atteintes par excitation à l'aide de

**Fig. 1. — Comparaisons de lasers à He-Ne à $\lambda = 633$ nm auxquelles le BIPM a participé. Les signes * et + indiquent respectivement :
 * que le laser était asservi sur la dérivée cinquième du signal ;
 + que la fréquence absolue du laser INMI2 a été déterminée au LPTF (Paris) entre les deux mesures.**

diodes laser, comme le montrent les travaux de Hollberg au NIST (Boulder).

5. Étalons matériels de longueur

5.1 Quels sont les types d'étalons de longueur étalonnés dans votre laboratoire (règles, étalons à bouts, calibres etc.)? Quelles sont les incertitudes associées?

NRC Les laboratoires d'étalonnage du NRC pour les étalons mécaniques de longueur sont en cours de rénovation et plusieurs instruments nouveaux devraient être installés dans l'avenir;

Étalons à bouts :

calibres jusqu'à 50 mm : ± 50 nm,

calibres au-dessus de 50 mm : $\pm 1 \times 10^{-6} L^{***}$;

Étalons à traits :

en mode statique : ± 20 nm,

en mode balayage : ± 100 nm;

Rubans dits géodésiques :

rubans jusqu'à 50 m : ± 5 μ m à $\pm 0,3$ μ m;

Étalons de diamètre :

bagues de 50 mm à 150 mm : $\pm 0,5$ μ m à $\pm 0,7$ μ m;

Étalons d'angle :

$\pm 0,1''$ est l'exactitude normale pour l'étalonnage des calibres d'angle de la meilleure qualité;

Étalons de planéité :

plans optiques jusqu'à un diamètre de 150 mm : ± 25 nm.

À l'étude : métrologie dimensionnelle générale, étalons de cylindrité, étalons de rugosité, étalons de planéité.

CSIRO Règles divisées étalons jusqu'à 1 m :

règles avec des traits de 2 μ m à 5 μ m de largeur :

0,1 μ m + $0,1 \times 10^{-6} L$,

règles avec des traits de 100 μ m à 200 μ m de largeur :

0,5 μ m + $0,5 \times 10^{-6} L$;

Rubans géodésiques jusqu'à 60 m :

rubans en invar : 1×10^{-6} ,

rubans en acier : $2,5 \times 10^{-6}$;

Réglettes micrométriques jusqu'à 10 mm : 0,2 μ m à 0,5 μ m;

*** L est la longueur.

Étalons à bouts (par interférométrie) :
jusqu'à 100 mm : 0,032 μm à 0,077 μm ,
de 100 mm à 400 mm : 0,2 μm à 0,6 μm ;
Étalons à bouts (par comparaison) :
jusqu'à 100 mm : 0,08 μm à 0,12 μm ,
de 100 mm à 400 mm : 0,3 μm à 0,7 μm ,
de 400 mm à 1000 mm : 1,2 μm à 2,0 μm ;
Calibres à gradins et étalons à bouts (par mesure des coordonnées tri-dimensionnelles) : 0,2 μm + $1,3 \times 10^{-6} L$;
Étalons de référence pour la métrologie dimensionnelle (bagues, tampons, sphères etc.) aux incertitudes normalisées.

IMGC Calibres :
de 0,1 mm à 100 mm : 0,02 μm + $0,3 \times 10^{-6} L$,
de 100 mm à 1000 mm : 0,03 μm + $0,1 \times 10^{-6} L$;
Étalons à traits :
de 100 mm à 1000 mm : 0,15 μm + $0,2 \times 10^{-6} L$;
Étalons de diamètre :
bagues et tampons de 3 mm à 250 mm :
0,15 μm + $0,2 \times 10^{-6} L$;
Calibres à gradins jusqu'à 1 m : 0,3 μm + $1 \times 10^{-6} L$;
Étalons de cylindrité de diamètre 4 mm à 150 mm : 20 nm;
Plateaux tournants à indexage ou polygones optiques de
360 ° : 0,2";
Calibres d'angle : 0,5";
Autocollimateurs : 0,2";
Pentaprismes : 1".

VNIIM Règles divisées
jusqu'à 1000 mm : 0,03 μm ;
Étalons à bouts
jusqu'à 1000 mm : 0,03 μm ;
Règles divisées à incrémentation
jusqu'à 1000 mm : 0,02 μm ;
Interféromètres laser
jusqu'à 1000 mm : 0,01 μm ;
Règlettes divisées submillimétriques
0,8 μm à 100 μm : 0,01 μm .

LPI Pas de réponse.

VNIIFTRI Pas de réponse.

NIM Calibres < 1000 mm : 0,05 μm + $0,5 \times 10^{-6} L$;
Règles divisées < 1000 mm :
en invar : 0,2 μm et en acier : 0,1 μm + $0,4 \times 10^{-6} L$;

	<p>Rubans géodésiques < 24 m : $1 \times 10^{-6} L$; Coefficient de dilatation thermique 24 m : $0,03 \times 10^{-6}/K$; Plateau tournant à indexage à 360, 720, 1440 dents : 0,2"; Mesure de petits angles < 10° : 0,05"; Maîtresse développante : 1,5 μm; Planéité < 150 mm : $\lambda/100$; Bague < 50 mm : 0,2 μm; Tampon conique < 150 mm : 0,3 $\mu m + 0,01 \times 10^{-6} L$; Interféromètre : 0,02 $\mu m + 1 \times 10^{-7} L$.</p>
NIST	<p>Calibres : 0,04 $\mu m + 4 \times 10^{-7} L$; Règles divisées : 0,006 $\mu m + 1 \times 10^{-7} L$.</p>
NPL	<p>Calibres de 0,5 mm à 100 mm : 0,02 $\mu m + 0,2 \times 10^{-6} L$; Règles divisées et longues séries de calibres : de 25 mm à 100 mm : 0,04 $\mu m + 0,8 \times 10^{-6} L$, de 100 mm à 1000 mm : 0,10 $\mu m + 0,4 \times 10^{-6} L$, de 1000 mm à 1500 mm : 0,15 $\mu m + 0,4 \times 10^{-6} L$; Calibres à gradins, de 400 mm à 1000 mm : 0,5 $\mu m + 0,6 \times 10^{-6} L$; Règles divisées, jusqu'à 1000 mm : 0,5 μm.</p>
NRLM	<p>Règles divisées : 3×10^{-7}; Calibres : 3×10^{-7}; Rubans flexibles : 2×10^{-5}.</p>
PTB	<p>[‘Mess- und Prüfmöglichkeiten der Physikalisch-Technische Bundesanstalt’ (Testing and Measurement in the Physikalisch-Technische Bundesanstalt) Braunschweig (1988/89), 30 et 33-36].</p>
CSMU	<p>Règles divisées : 0,2 $\mu m + 0,5 \times 10^{-6} L$; Calibres : 0,02 $\mu m + 0,2 \times 10^{-6} L$.</p>
CSIR	<p>Règles divisées : $\pm 1 \mu m$; Étalons à bouts : $< 1 \times 10^{-6}$; Bagues, tampons : $\pm 0,8 \mu m$; Rubans en invar (jusqu'à 50 m) : $\pm 5 \times 10^{-6}$.</p>
OFMET	<p>Voir document CCDDM/92-17a.</p>
DSIR	<p>Étalons à bouts : 0,025 $\mu m + 1 \times 10^{-6} L$; Règles divisées : 1 μm ou 1×10^{-6}; Mesures dimensionnelles avec un instrument de Leitz : 2 μm.</p>

INM/LNE	<p>Règles divisées de zéro à 3000 mm, avec une incertitude-type**** de $0,015 \mu\text{m} + 0,15 \times 10^{-6} L$;</p> <p>Calibres de 0,5 mm à 100 mm, avec une incertitude-type de $0,006 \mu\text{m} + 0,05 \times 10^{-6} L$;</p> <p>Calibres de 100 mm à 300 mm, avec une incertitude-type de $0,15 \times 10^{-6} L$;</p> <p>Calibres de 20 mm à 3000 mm, avec une incertitude-type de $0,17 \mu\text{m} + 0,15 \times 10^{-6} L$;</p> <p>Bague de diamètre intérieur de 1 mm à 100 mm, avec une incertitude-type de $0,05 \mu\text{m} + 0,1 \times 10^{-6} D$***** ;</p> <p>Tampon de diamètre extérieur ou sphère de 1 mm à 100 mm, avec une incertitude-type de $0,05 \mu\text{m} + 0,1 \times 10^{-6} D$;</p> <p>Calibre à gradins de 5 mm à 800 mm, avec une incertitude-type de $0,15 \mu\text{m} + 0,5 \times 10^{-6} L$;</p> <p>Broches (à bouts sphériques) de 20 mm à 3000 mm, avec une incertitude-type de $0,17 \mu\text{m} + 0,15 \times 10^{-6} L$.</p>
BIPM	<p>Règles divisées de 1 m, avec une incertitude-type de type A de 10 nm ; de type B de 20 nm ;</p> <p>Étalons à bouts de 500 mm à 1000 mm, avec une incertitude-type de type A de 10 nm ; de type B de $2,0 \times 10^{-8} L$.</p>
KRISS	<p>Règle divisée : 0,12 μm ;</p> <p>Calibre de 250 mm : 0,05 μm ;</p> <p>Calibre de 1 m : 0,6 μm.</p>
IPL	Pas de réponse.
JILA	Pas de réponse.

5.2 Y-a-t'il plus, autant ou moins de demandes pour ces types d'étalonnages ? Y-a-t'il des demandes pour en accroître l'exactitude ?

NRC	<p>En général, nous n'avons pas assez de personnel pour répondre aux demandes relatives à tous les types d'étalonnage. En ce qui concerne l'exactitude, nos clients nous demandent de répondre le « mieux possible », quel que soit le coût. La demande d'accroissement d'exactitude est généralement motivée par nos besoins internes d'amélioration des techniques et instruments de mesures. Pour répondre aux demandes, quand nous en aurons les moyens, nous voulons renforcer la régulation et la mesure des conditions ambiantes</p>
-----	---

**** Voir ISO/TAG 4/WG 3 (juin 1992).

***** D est le diamètre.

de notre laboratoire, et automatiser les mesures de fraction de frange sur l'interféromètre destiné aux étalons à bouts.

CSIRO	<p>Il y a peu de demandes pour des étalonnages de règles divisées de précision de la part des industriels. Par contre, il y a toujours de la demande pour les règles divisées étalons avec des traits de 100 μm (environ dix règles sur une période de dix ans).</p> <p>Il y a toujours une demande pour les rubans géodésiques. La demande est constante pour les étalons à bouts. Nous modernisons actuellement les installations pour les étalonnages par interférométrie des grands étalons de longueur à bouts (de 500 mm à 2000 mm), pour répondre aux besoins. La demande pour des étalonnages de calibres à mâchoires est aussi en augmentation.</p>
IMGC	<p>Les demandes d'étalonnage sont assez constantes. Toutefois, on s'attend, dans un proche avenir, à une augmentation des demandes, en raison des besoins de certification. Il s'agit, plutôt que d'une demande de l'augmentation de l'exactitude, d'un besoin largement ressenti de pouvoir bénéficier de l'évolution vers la diminution de l'incertitude que peut garantir le laboratoire primaire.</p>
VNIIM	<p>La demande d'étalonnage de règles divisées et d'étalons à bouts est constante. La demande d'étalonnage d'interféromètres laser et de règlettes submillimétriques (de petite longueur) (réseaux, échelles de largeur de traits etc.) est en augmentation.</p>
LPI	<p>Pas de réponse.</p>
VNIIFTRI	<p>Pas de réponse.</p>
NIM	<p>Pas de réponse.</p>
NIST	<p>La demande d'étalonnages et l'exactitude demandée de nos étalons restent constantes.</p>
NPL	<p>Calibres : demande constante en nombre et en exactitude ; Étalons à bouts : demande constante en nombre, demande d'exactitude accrue ; Calibres à gradins : demande accrue en nombre et en exactitude ; Règles divisées : nombre de demandes en diminution, mais demande d'exactitude constante.</p>

NRLM	Demande accrue pour les types d'étalonnages cités au point 5.1. [MATSUMOTO H., Report on the Round-robin Measurement of Gauge Blocks in 1990, <i>Bul. NRLM</i> , 1991, 40 , 172].
PTB	La demande d'étalonnage de calibres est en augmentation, en raison, d'une part, de la réunification de l'Allemagne et, d'autre part, de l'accroissement du nombre de laboratoires du service d'étalonnage allemand (DKD).
CSMU	La demande de vérification (étalonnage) est constante pour chaque type d'étalonnage, de même que l'exactitude requise.
CSIR	La demande est constante pour les règles divisées, les bagues, tampons et rubans. Nous constatons un léger accroissement des demandes pour les étalons à bouts.
OFMET	Calibres : demande constante ; Règles divisées : demande en diminution pour les règles en acier en X ou en H, demande accrue pour les règles divisées de type spécial (à incrémentation, en verre) ; Calibres à gradins : demande accrue ; Il n'y a pratiquement pas de demande pour une exactitude supérieure à celle déjà réalisée à l'OFMET.
DSIR	Demande accrue d'étalonnages à la suite de la publication des normes ISO 9000, mais pas de demande pour un accroissement de l'exactitude.
INM/LNE	Évolution du nombre de demandes : règles divisées : peu de demandes ; réseaux : en augmentation ; calibres : stable ; diamètres internes et externes : en augmentation ; grands calibres et calibres à gradins : en augmentation.
BIPM	Demande accrue, mais l'exactitude requise reste la même.
KRISS	Demande constante, mais demandes pour en accroître l'exactitude.
IPL	Pas de réponse.
JILA	Pas de réponse.

5.3 Avez-vous à signaler de nouveaux domaines de la métrologie des longueurs susceptibles de retenir votre attention à l'avenir?

NRC	Nous avons eu des demandes de renseignements relatives à des essais de dureté, à des formes complexes de filets et roues dentées, des réseaux d'étalonnage par microscopie à balayage électronique, et de la métrologie dimensionnelle des structures des circuits intégrés. Certains de ces domaines sont tout à fait nouveaux. Malheureusement, faute de moyens, notre groupe doit continuer à se consacrer essentiellement à son programme courant d'activités de base.
CSIRO	Localisation de surfaces sans contact pour la mesure de coordonnées tri-dimensionnelles.
IMGC	Nanométrie ; Mesures de forme ; Mesures de coordonnées tri-dimensionnelles.
VNIIM	Les domaines nouveaux de la métrologie des longueurs qui ont attiré notre attention sont les mesures dimensionnelles dans la région de 3 nm à 3×10^5 nm, et l'étalonnage d'interféromètres laser avec une incertitude d'environ 2 à 3 nm.
LPI	Pas de réponse.
VNIIFTRI	Pas de réponse.
NIM	Pas de réponse.
NIST	La taille de plus en plus réduite et la densité de plus en plus grande des composants des circuits intégrés sont susceptibles de rendre nécessaires des progrès dans les domaines de l'interférométrie de haute précision et des techniques de mesure bi-dimensionnelles.
NPL	Détermination absolue de la correction de phase en interférométrie ; Application de l'interférométrie absolue aux objets de géométrie plus complexe.
NRLM	Étalonnage de plusieurs mètres à quelques dizaines de kilomètres avec une incertitude relative de 10^{-6} à 10^{-7} ;

Étalons de largeur de traits de circuits intégrés de grande taille ;

Mesures de précision du nanomètre au picomètre.

PTB	L'étude de nouvelles technologies du type de la microscopie à effet tunnel ou à forces atomiques, avec un pouvoir de résolution élevé en trois dimensions, est susceptible de conduire à de nouveaux types de palpeurs utilisables en métrologie des longueurs et pour l'examen des surfaces.
CSMU	Vérification des rubans de mesure jusqu'à une longueur de 24 m ; Étalonnage de systèmes de mesure électronique de distance pour la géodésie et le contrôle des mesures des bases associées jusqu'à 1 km ; Mesure des coordonnées.
CSIR	Pas de nouveaux domaines au niveau international, mais pour l'Afrique du Sud il faut inclure l'étalonnage des machines à mesurer les coordonnées tri-dimensionnelles et la vérification des étalons d'angle.
OFMET	Métrologie en-dessous du micromètre et nanométrologie, en particulier vérification d'étalons de largeur de traits, de masques bi-dimensionnels, de surfaces lisses, de tampons de petit diamètre.
DSIR	Les mesures au-dessus de 5 m sont susceptibles de retenir notre attention à l'avenir.
INM/LNE	Trois domaines : la nanométrologie, la métrologie des coordonnées, l'interférométrie utilisant des diodes laser.
BIPM	Pas de réponse.
KRISS	Mesure de largeur de traits sur des semiconducteurs ; Interférométrie des rayons x.
IPL	Pas de réponse.
JILA	Nous recevons un grand nombre de demandes de renseignements concernant la stabilité dimensionnelle à long terme des matériaux, en particulier du Zerodur et de l'ULE.

5.4 Certains domaines de la métrologie des longueurs devraient-ils faire l'objet d'une comparaison internationale entre laboratoires nationaux ?

- NRC Les calibres constituent encore notre principal moyen de dissémination du mètre dans l'industrie. Une exactitude plus élevée a-t-elle été demandée et réalisée en ce domaine ?
La comparaison d'étalons d'angle commencée en 1979 a obligé de nombreux laboratoires à améliorer leurs systèmes d'étalonnage des angles. Il serait intéressant de comparer les différents nouveaux systèmes.
Les rubans géodésiques constituent toujours une importante catégorie d'étalons mécaniques de longueur. Il serait intéressant de comparer les différentes méthodes de mesure.
- CSIRO Nous n'avons participé à aucune comparaison internationale d'étalons à bouts en dehors de la région Asie/Pacifique depuis de nombreuses années. Nous pensons qu'une telle comparaison serait utile pour les calibres (jusqu'à 100 mm). Les étalons à bouts (de 500 mm à 1000 mm) sont employés de plus en plus fréquemment pour l'étalonnage de machines à mesurer les coordonnées, et des comparaisons internationales récentes effectuées sous les auspices de l'International Institution for Production Engineering Research (CIRP) ont montré un très mauvais accord entre les laboratoires. Une comparaison internationale est tout à fait souhaitable.
- IMGC Voir 5.3. En Europe, ces comparaisons sont généralement effectuées sous les auspices d'EUROMET et du Bureau communautaire de référence (BCR).
- VNIIM Nous suggérons d'effectuer des comparaisons internationales de réfractomètres laser interférentiels et de petites règles divisées.
- LPI Pas de réponse.
- VNIIFTRI Pas de réponse.
- NIM Nous suggérons d'organiser une comparaison internationale de réseaux optiques linéaires parce que le rendement et l'emploi de tels systèmes augmentent rapidement ces dernières années et qu'ils tendent à remplacer les règles divisées. Actuellement, il serait intéressant de discuter de la nature des vérifications à faire, de la méthode employée, etc.

NIST	Des comparaisons internationales de calibres et de règles divisées nous seraient utiles.
NPL	Dilatation thermique des calibres et des étalons à bouts ; Longueur des règles.
NRLM	Il pourrait devenir nécessaire d'effectuer une comparaison internationale de calibres.
PTB	Des comparaisons internationales de calibres sont actuellement organisées sous les auspices d'EUROMET. Il serait souhaitable d'élargir ces comparaisons à d'autres laboratoires nationaux situés hors d'Europe.
CSMU	Étalons de longueur de 1 m ; Étalons mécaniques pour les longueurs micrométriques (de 0,7 μm à 100 μm) ; Étalons spéciaux (artefacts), utilisés pour l'étalonnage des machines à mesurer les coordonnées tri-dimensionnelles ; Étalons d'angle (polygones optiques et auto-collimateurs).
CSIR	Les comparaisons internationales organisées sous l'égide du Western European Calibration Cooperation (WECC) satisfont les besoins de l'Afrique du Sud pour le moment.
OFMET	Des comparaisons internationales, du type de celles qui sont actuellement organisées sous les auspices d'EUROMET et du Bureau communautaire de référence pour les laboratoires nationaux, devraient être organisées régulièrement.
DSIR	Comparaison internationale de calibres.
INM/LNE	Au niveau d'EUROMET, comparaison de calibres, de calibres de grande dimension et de règles divisées.
BIPM	Pas de réponse.
KRISS	Demande que soient organisées des comparaisons internationales d'étalons de largeur de traits entre les laboratoires nationaux.
IPL	Pas de réponse.
JILA	Pas de réponse.

5.5 Quels moyens utilisez-vous pour déterminer l'indice de réfraction de l'air pour la comparaison d'étalons de longueur d'onde et d'étalons matériels de longueur?

NRC	Au NRC, nous mesurons les principaux paramètres (température, pression et humidité) et nous calculons l'indice de réfraction en utilisant une version modifiée de la formule de Bengt Edlén de 1966.
CSIRO	Nous utilisons la formule d'Edlén (document CCDM/92-5b).
IMGC	Jusqu'à ce jour, les déterminations de l'indice de réfraction de l'air étaient fondées sur la formule d'Edlén modifiée ainsi que sur des capteurs étalonnés pour la mesure des paramètres de l'environnement. L'IMGC s'apprête à utiliser la réfractométrie directe, avec un réfractomètre à air de type fixe et un autre de type transportable, en cherchant à atteindre une exactitude de quelques 10^{-8} .
VNIIM	Le VNIIM utilise des réfractomètres laser interférentiels pour déterminer l'indice de réfraction de l'air.
LPI	Pas de réponse.
VNIIFTRI	Pas de réponse.
NIM	Le NIM utilise la formule d'Edlén, avec une exactitude de 1×10^{-7} ; Mesures avec un interféromètre de Rayleigh, avec une exactitude de 8×10^{-8} ; Mesures avec un interféromètre laser, avec une exactitude de 8×10^{-8} ; Mesure avec un interféromètre laser à battement de fréquence, avec une exactitude de 5×10^{-8} à 1×10^{-7} .
NIST	Mesure de la température atmosphérique, de la pression et de l'humidité, et calcul de l'indice de réfraction de l'air à l'aide d'une version modifiée de la formule d'Edlén.
NPL	Dans certains cas, le NPL calcule l'indice de réfraction de l'air à partir de la formule d'Edlén, mais il utilise la réfractométrie absolue pour d'autres instruments.
NRLM	Formule d'Edlén; Interféromètre avec un trajet dans le vide;

Méthode utilisant plusieurs longueurs d'onde
(document CCDM/92-13a).

PTB	Applique la formule d'Edlén pour certains types de mesures, et mesure l'indice de réfraction avec un réfractomètre pour d'autres.
CSMU	Utilise la formule d'Edlén.
CSIR	Utilise la formule d'Edlén.
OFMET	Utilise la formule d'Edlén, mais un réfractomètre a été construit.
DSIR	Utilise la formule d'Edlén.
INM/LNE	Utilise la formule de Bengt Edlén (<i>Metrologia</i> , 1966 et Jones, NBS, 1980). Effectuera à l'avenir la mesure directe de l'indice de réfraction.
BIPM	Utilise un réfractomètre interférentiel.
KRISS	Chambre à vide ou formule d'Edlén dans l'interféromètre utilisé pour les calibres; Pour la plupart des mesures : formule d'Edlén; Réfractomètre laser en cours de construction.
IPL	Pas de réponse.
JILA	Réfractomètre simple fondé sur un ajustement par ordinateur à partir de la distribution angulaire de franges d'égale inclinaison dans un interféromètre stable, du type de Perot-Fabry à miroirs plans ($d\lambda/\lambda \approx 10^{-8}$), en accord avec la formule d'Edlén à mieux que 2×10^{-7} .

TABLE DES MATIÈRES
TABLE OF CONTENTS

COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DU MÈTRE

8^e session (1992)
8th Meeting (1992)

	Pages
Liste des sigles utilisés dans le présent volume	V
List of acronyms used in the present volume	V
Le BIPM et la Convention du Mètre	IX
Liste des membres du Comité consultatif pour la définition du mètre	XI
Ordre du jour	XIV
 Rapport au Comité international des poids et mesures, par W.R.C. Rowley ...	M 1
1. Ouverture de la session. Nomination d'un rapporteur	M 2
2. Progrès effectués depuis 1982 sur les radiations de lasers asservis recommandées pour la réalisation pratique du mètre	M 2
Laser asservi sur le méthane (88 THz, 3,39 μ m)	M 3
Laser asservi sur l'iode (473 THz, 633 nm)	M 4
Autres radiations recommandées	M 6
Nouvelles radiations	M 6
Recommandation	M 7
3. Comparaisons internationales	M 7
Étalons d'angle	M 7
Lasers asservis	M 8
Groupe de travail sur les comparaisons internationales (Groupe de travail du CCDM sur la métrologie dimensionnelle)	M 8

Cales étalons	M 10
4. Travaux du BIPM	M 10
5. Questions diverses	M 11
Recommandations présentées au Comité international des poids et mesures	
M 1 (1992) : Révision de la mise en pratique de la définition du mètre	M 13
M 2 (1992) : Études à poursuivre	M 14
Recommandation adoptée par le Comité international des poids et mesures	
Recommandation 3 (CI-1992) : Révision de la mise en pratique de la définition du mètre	M 15
Annexes	
M 1. Documents de travail présentés à la 8 ^e session du CCDM	M 20
M 2. Données utilisées pour établir la liste des radiations recommandées, 1992 .	M 36
Données utilisées	M 36
Bibliographie commentée	M 43
M 3. Intervalles de fréquence entre composantes hyperfines de raies d'absorption de l'iode	M 51
M 4. Questionnaire adressé par le BIPM aux laboratoires membres du CCDM	M 67
M 4A Questionnaire	M 67
M 4B Résumé des réponses	M 69

English text of the report

Note on the use of the English text. Note sur l'utilisation du texte anglais	M 113
The BIPM and the Convention du Mètre	M 115
Members of the Comité Consultatif pour la Définition du Mètre	M 117
Agenda	M 120
Report to the Comité International des Poids et Mesures, by W.R.C. Rowley	
1. Opening of the meeting. Designation of a rapporteur	M 122
2. Progress made since 1982 concerning the stabilized-laser radiations recommended for the practical realization of the metre	M 123
Methane-stabilized laser (88 THz, 3,39 μ m)	M 123
Iodine-stabilized laser (473 THz, 633 nm)	M 124
Other recommended radiations	M 126
New radiations	M 126
Recommendation	M 127

3. International comparisons	M 127
Angle standards	M 127
Stabilized lasers	M 128
Working Group on International Comparisons (CCDM Working Group on Dimensional Metrology)	M 128
Gauge blocks	M 129
4. BIPM activity	M 130
5. Other business	M 130

**Recommendations submitted to the Comité International des Poids et
Mesures**

M 1 (1992): Revision of the mise en pratique of the definition of the metre	M 132
M 2 (1992): Future work	M 133

**Recommendation adopted by the Comité International des Poids et
Mesures**

Recommendation 3 (CI-1992): Revision of the mise en pratique of the definition of the metre	M 134
--	-------

Appendices

M 1. Working documents submitted to the CCDM at its 8th meeting (see page M 20)	M 139
M 2. Source data for the list of recommended radiations, 1992	M 140
Source data	M 140
Annotated bibliography	M 147
M 3. Frequency intervals between hyperfine components of absorption lines of iodine	M 154
M 4. Questionnaire sent by the BIPM to members laboratories of the CCDM	M 170
M 4A Questionnaire.....	M 170
M 4B Abstract of replies	M 172

IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS

PARIS 18^e

Dépôt légal, Imprimeur, 1995, n° 4364

ISBN 92-822-2132-6

ISSN 1016-3778

ACHEVÉ D'IMPRIMER : FÉVRIER 1995

Imprimé en France