

**COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DU MÈTRE**

**SESSION DE 1982**

---



COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

---

COMITÉ CONSULTATIF

POUR

# LA DÉFINITION DU MÈTRE

---

7<sup>e</sup> SESSION — 1982



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Pavillon de Breteuil, F-92310 SÈVRES, France

*Dépositaire* : OFFILIB, 48 rue Gay-Lussac, F-75005 Paris



---

## NOTICE HISTORIQUE

### Les organes de la Convention du Mètre Le Bureau International, le Comité International et la Conférence Générale des Poids et Mesures

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 m<sup>2</sup>) 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<sup>(1)</sup>.

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) et des rayonnements ionisants (1960). Dans ce but, un agrandissement des premiers laboratoires construits en 1876-1878 a eu lieu en 1929 et deux nouveaux bâtiments ont été construits en 1963-1964 pour les laboratoires de la Section des rayonnements ionisants.

Une trentaine de physiciens ou techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau International ; ils font des recherches métrologiques ainsi que des mesures dont les résultats sont consignés dans des certificats portant sur des étalons des grandeurs ci-dessus. La dotation annuelle du Bureau International est de l'ordre de 9 570 000 francs-or (en 1982), soit environ 17 400 000 francs français.

---

(1) Au 31 décembre 1982, quarante-six États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne (Rép. Fédérale d'), Allemande (Rép. Démocratique), Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), 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, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Venezuela, Yougoslavie.

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 modifications à apporter aux définitions et aux valeurs des 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 (*Procès-Verbaux CIPM*, 31, 1963, p. 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 huit :

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  $\gamma$ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie  $\alpha$ ) ; 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.

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 de temps en temps, sous le titre *Les récents progrès du Système Métrique*, un rapport sur les développements du Système Métrique (SI) dans le monde.

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. DE BOER

*Président*  
J. V. DUNWORTH

---

LISTE DES MEMBRES  
DU  
COMITÉ CONSULTATIF  
POUR LA DÉFINITION DU MÈTRE

---

*Président*

D. KIND, Vice-Président du Comité International des Poids et Mesures,  
Président de la Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig.

*Membres*

AMT FÜR STANDARDISIERUNG, MESSWESEN UND WARENPRÜFUNG [ASMW],  
Berlin.

BUREAU NATIONAL DE MÉTROLOGIE, Paris : Institut National de Métrologie  
[INM] du Conservatoire National des Arts et Métiers [CNAM].

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES [NRC], Ottawa.

CSIRO, DIVISION OF APPLIED PHYSICS [CSIRO], Lindfield (Australie).

INSTITUT DE MÉTROLOGIE D.I. MENDÉLÉEV [IMM], Leningrad.

INSTITUT NATIONAL DE MÉTROLOGIE [NIM], Beijing.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [NBS], Washington/JOINT INSTITUTE FOR  
LABORATORY ASTROPHYSICS [JILA], Boulder (États-Unis d'Amérique).

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [NPL], Teddington (Grande-Bretagne).

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY [NRLM], Ibaraki  
(Japon).

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [PTB], Braunschweig.

UNION ASTRONOMIQUE INTERNATIONALE [UAI].

B. EDLÉN, Fysiska Institutionen, Lund (Suède).

L. FRENKEL, Lynn (États-Unis d'Amérique).

K. SHIMODA, University of Tokyo, Tokyo.

Le directeur du Bureau International des Poids et Mesures [BIPM], Sèvres.

---



## ORDRE DU JOUR

de la 7<sup>e</sup> Session

---

1. Définition du mètre
    - a) Rappel des conclusions du Groupe de travail *ad hoc* CCDM/CCU d'avril 1981.
    - b) En vue de la « mise en pratique » : examen des documents reçus, des réponses aux propositions et au questionnaire du BIPM et des derniers résultats obtenus dans les laboratoires.
    - c) Formulation d'une recommandation relative à une nouvelle définition du mètre.
    - d) Formulation de recommandations en vue de la « mise en pratique » de la nouvelle définition.
  2. Tâches futures du BIPM relatives à la nouvelle définition.
  3. Comparaison internationale de mesure de règle à traits et comparaison internationale de mesure d'angle.
  4. Questions diverses.
-

---

RAPPORT  
DU  
COMITÉ CONSULTATIF  
POUR LA DÉFINITION DU MÈTRE  
(7<sup>e</sup> Session — 1982)  
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 septième session au Pavillon de Breteuil, à Sèvres, les jeudi 3 et vendredi 4 juin 1982.

Étaient présents :

D. KIND, Vice-Président du CIPM, président du CCDM.

Les délégués des laboratoires membres :

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung [ASMW],  
Berlin (K. SCHMIDT).

Bureau National de Métrologie, Paris: Institut National de  
Métrologie [INM] du Conservatoire National des Arts et Métiers  
[CNAM] (P. BOUCHARÉINE, P. CÉREZ du Laboratoire de l'Horloge  
Atomique, Orsay).

Conseil National de Recherches [NRC], Ottawa (K. M. BAIRD).

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield  
(P. E. CIDDOR).

Institut de Métrologie D.I. Mendéléev [IMM], Leningrad  
(A. N. TITOV).

Institut National de Métrologie [NIM], Beijing (LU SHAOZENG).

National Bureau of Standards [NBS], Washington (K. G. KESSLER,  
D. JENNINGS)/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], Ibaraki  
(K. TANAKA).  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig  
(J. HELMCKE).

Le directeur du Bureau International des Poids et Mesures [BIPM],  
Sèvres (P. GIACOMO).

Invités :

Československý Metrologický Ústav [CSMU], Bratislava  
(J. BLABLA).

Istituto di Metrologia G. Colonnetti [IMGC], Turin (S. SARTORI).  
National Physical Research Laboratory [NPRL], Pretoria (J. BRINK).  
M. GARAVAGLIA, Directeur du Centro de Investigaciones Opticas, La  
Plata, Argentine.

Assistaient aussi à la session : J. TERRIEN, directeur honoraire du BIPM;  
T. J. QUINN, Sous-directeur; P. CARRÉ, A. SAKUMA, J. HAMON,  
J.-M. CHARTIER, R. FELDER, M. GLÄSER (BIPM).

Excusés : B. EDLÉN (Lund), L. FRENKEL (Lynn), K. SHIMODA  
(Tokyo), membres nominativement désignés; Union Astronomique  
Internationale (A. H. COOK).

Le Président ouvre la session en souhaitant la bienvenue aux  
participants et exprime sa certitude que cette session sera intéressante et  
fructueuse.

Mr Rowley est nommé rapporteur et accepte de participer à la réunion  
du Comité Consultatif des Unités (CCU) qui doit se tenir du 8 au 10 juin  
1982 afin d'y représenter le point de vue du CCDM dans les discussions  
concernant ses recommandations.

L'ordre du jour est approuvé.

### **Progrès effectués depuis 1979 sur les mesures de fréquence et de longueur d'onde et sur la reproductibilité des lasers asservis**

Lors de sa session précédente en 1979, le CCDM avait considéré qu'une  
redéfinition du mètre serait bientôt nécessaire mais que les progrès réalisés  
dans le développement des techniques nécessaires pour sa mise en  
application n'étaient pas encore suffisants. Il avait préféré pour la  
redéfinition une formulation qui maintiendrait inchangée la valeur de la  
vitesse de la lumière  $c = 299\,792\,458$  m/s, valeur qui avait fait l'objet d'une  
recommandation du CIPM en 1973, puis, en 1975, d'une résolution de la  
15<sup>e</sup> Conférence Générale des Poids et Mesures. Pour sa mise en pratique

dans les mesures de laboratoire, une telle définition nécessite une connaissance exacte de la fréquence  $f$  d'une ou plusieurs radiations de lasers asservis, d'où l'on puisse déduire la longueur d'onde correspondante  $\lambda$  à partir de la relation  $\lambda = c/f$ .

Avant la présente réunion, des informations concernant les progrès réalisés depuis 1979 ont été fournies par les membres du CCDM en réponse à un questionnaire envoyé par le BIPM (Doc. 82-3). Un résumé de ces réponses a été préparé par le BIPM (Doc. 82-26).

### Mesures de fréquence

La majorité des mesures de fréquence présentées concernent la radiation du laser à He-Ne asservi sur l'absorption saturée du méthane ( $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ ). Une ou plusieurs mesures ont été exécutées à l'INM, à l'IMM, au NPL et au NRC; d'autres mesures sont en cours à l'IMGC et à la PTB. Six valeurs de la fréquence de cette radiation ont été déterminées par rapport à la fréquence étalon du césium avec des incertitudes relatives (écarts-types estimés) meilleures que  $2 \times 10^{-10}$ .

Plusieurs laboratoires ont réalisé, ou sont en train de faire, des mesures de fréquence de radiations du laser à gaz carbonique ( $\lambda \approx 10 \mu\text{m}$ ). Quoique ces radiations ne soient pas, actuellement, utilisées dans les mesures précises de longueur, elles constituent un important maillon de la chaîne des mesures de fréquence entre la fréquence étalon du césium et les radiations visibles.

Des mesures particulièrement importantes ont été faites au NBS. Des valeurs ont été obtenues pour la fréquence de deux radiations visibles de lasers asservis ( $\lambda = 576 \text{ nm}$  et  $\lambda = 633 \text{ nm}$ ), avec des incertitudes relatives estimées à  $1,5 \times 10^{-10}$  (Doc. 82-30). C'est la première fois que l'on obtient des valeurs de la fréquence de radiations visibles exclusivement par des méthodes de mesure de fréquence et avec des incertitudes comparables à la reproductibilité des lasers.

### Mesures de longueur d'onde

Les mesures interférométriques de longueur d'onde qui sont, en fait, des mesures de rapport de longueurs d'onde, reposent sur une méthode bien établie pour relier entre elles des longueurs d'onde de radiations étalons dans le visible. Dans le contexte de la redéfinition du mètre proposée, ces mesures complètent les mesures directes de fréquence. Le rapport des longueurs d'onde est l'inverse du rapport des fréquences de sorte que des mesures de longueurs d'onde peuvent être utilisées pour déterminer la valeur de la fréquence de plusieurs radiations visibles par référence à une seule radiation visible ou infrarouge dont la fréquence a été directement mesurée.

De récentes mesures de longueur d'onde ont été faites au BIPM, au NIM, au NRC, au NRLM et à la PTB. Les incertitudes relatives (écart-types estimés) sont de  $1 \times 10^{-10}$  à  $3 \times 10^{-10}$  pour les comparaisons entre radiations visibles; mais pour les comparaisons entre des radiations visibles et des radiations infrarouges, les incertitudes vont de  $2 \times 10^{-10}$  à  $2 \times 10^{-9}$ . L'incertitude la plus importante pour les mesures impliquant des radiations infrarouges provient de la difficulté de corriger les effets systématiques liés à la longueur d'onde et dus, entre autres, à la diffraction. Des études sur ces effets ont été décrites par le NPL, le NRLM et la PTB.

### Reproductibilité des lasers

La reproductibilité des lasers asservis est déterminée spécifiquement par la comparaison directe de lasers de laboratoires différents en utilisant la méthode des battements. Durant ces dernières années, le BIPM a été le centre de la plupart de ces comparaisons. Il a donné les résultats de cinq comparaisons à  $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ , treize comparaisons à  $\lambda = 633 \text{ nm}$  et une à  $\lambda = 612 \text{ nm}$ . De plus, d'autres comparaisons ont été faites entre l'IMM, le NBS et le NPL à  $\lambda = 633 \text{ nm}$ .

En conclusion de ces comparaisons, le BIPM estime que la reproductibilité du laser à He-Ne asservi sur le méthane à  $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$  est meilleure que 5 kHz (soit  $6 \times 10^{-11}$ ); les estimations d'autres laboratoires vont de  $\pm 2 \times 10^{-11}$  (PTB) à  $\pm 2 \times 10^{-10}$  (IMM).

Pour le laser à He-Ne asservi sur l'iode à  $\lambda = 633 \text{ nm}$ , avec une cuve interne, les conditions de fonctionnement ont une influence significative sur la fréquence et plusieurs laboratoires ont présenté des rapports sur ce sujet. La contamination de la cuve à iode et la structure hyperfine non résolue peuvent aussi réduire la reproductibilité. Plusieurs laboratoires pensent que pour des conditions de fonctionnement convenablement spécifiées la reproductibilité d'un laser à cuve interne est  $4 \times 10^{-11}$  (CSMU, IMGC, NPL),  $5 \times 10^{-11}$  (ASMW) ou  $6 \times 10^{-11}$  (NRLM); tandis que d'autres estiment la limite à  $1 \times 10^{-10}$  (PTB),  $2 \times 10^{-10}$  (NBS) ou même  $2 \times 10^{-9}$  (IMM).

Les autres lasers asservis dans le visible n'ont pas fait l'objet d'études aussi poussées, mais on estime que dans des conditions étroitement spécifiées, le laser à He-Ne à  $\lambda = 612 \text{ nm}$  peut être reproductible à  $8 \times 10^{-11}$  (BIPM) ou  $1 \times 10^{-10}$  (IMGC) et le laser à  $\text{Ar}^+$  à  $\lambda = 515 \text{ nm}$ , avec une cuve externe, reproductible à  $1 \times 10^{-11}$  (PTB).

### Formulation d'une nouvelle définition

Compte tenu des progrès dont il a été fait état concernant les mesures des fréquences de radiations de lasers dans le visible et le proche infrarouge,

leur comparaison au moyen de l'interférométrie et leur reproductibilité, le Président demande aux délégués d'exprimer leur opinion au sujet de la nouvelle définition du mètre proposée. Les questions importantes auxquelles il doit être répondu sont les suivantes :

Les travaux effectués jusqu'ici et les exactitudes actuellement atteintes sont-ils suffisants pour que les avantages d'une nouvelle définition soient effectifs ?

Un accord est-il maintenant possible sur le détail des moyens à recommander et des spécifications pour la mise en pratique d'une nouvelle définition ?

Le moment est-il venu de recommander une nouvelle définition du mètre ?

Chaque délégué, tour à tour, donne sa réponse à ces questions. Sans réserve, chacun répond par l'affirmative et la plupart expriment leur enthousiasme pour une nouvelle définition.

Lors de sa session précédente en 1979, le CCDM avait discuté et s'était mis d'accord sur les raisons pour lesquelles les progrès techniques ont rendu la définition actuelle du mètre insuffisante. Il n'est donc pas nécessaire de reconsidérer ce sujet. A cette même session, on avait aussi discuté de plusieurs formulations possibles pour une nouvelle définition. On était convenu que la seule solution viable serait une formulation qui fixerait la valeur de la vitesse de la lumière, de sorte que la longueur pourrait être déterminée soit à partir du trajet parcouru par la lumière dans un certain intervalle de temps ( $l = c.t$ ), soit à partir de la longueur d'onde d'une radiation monochromatique de fréquence connue ( $\lambda = c/f$ ).

Une formulation provisoire d'une nouvelle définition avait été établie en 1979 afin que le CIPM et les autres organismes intéressés aient le temps de voir si elle répondait à toutes les exigences. D'autres formulations avaient été proposées par diverses organisations ou personnalités. En avril 1981, le CIPM a suscité la réunion d'un Groupe de travail conjoint CCDM/CCU pour discuter de ces diverses propositions. Les conclusions de ce Groupe de travail sont :

1. Les diverses formulations qui ont été étudiées sont scientifiquement satisfaisantes et auront des conséquences semblables du point de vue de la technologie des mesures de longueur.

2. Les différentes préférences qui ont été exprimées résultent d'une pondération différente des considérations telles que simplicité, généralité et clarté, perturbation minimale du SI ou relation directe avec la mise en pratique.

3. Dans leur majorité, les membres du Groupe de travail se sont

ralliés à une définition fondée sur le trajet parcouru par la lumière dans un intervalle de temps donné.

Le Groupe de travail ayant ainsi approuvé la formulation proposée par le CCDM en 1979, il ne reste plus qu'à se mettre d'accord sur le texte précis d'une nouvelle définition et des « considérants » qui l'accompagnent. Le BIPM a préparé une rédaction provisoire comme base de discussion. De l'avis des délégués, celle-ci est en tous points satisfaisante. Seuls quelques changements rédactionnels mineurs des « considérants » sont proposés et un accord est rapidement atteint.

Une discussion a lieu concernant la rédaction de la nouvelle définition elle-même. Des objections avaient été faites (Doc. 82-10b, 82-15, 82-23b) au sujet de la phrase d'introduction de la traduction anglaise (Doc. 82-4E) : « The metre is the distance travelled... ». Une objection est que cela pourrait être interprété comme faisant du mètre une unité de distance plutôt que de longueur. On admet, cependant, que la difficulté n'existe que dans le texte anglais et peut être évitée par une autre traduction (proposée par Mr Baird) : « The metre is the length of the path travelled... ».

Une autre proposition plus fondamentale est de changer le texte en : « Le mètre est l'unité de longueur; il est égal à ... ». Cette formulation serait semblable à celle de la définition du kilogramme. Le CCDM reconnaît qu'il ne verrait pas d'objection à ce changement, mais qu'il n'a aucune préférence marquée pour l'une ou l'autre rédaction. Le sujet étant plutôt de la compétence du Comité Consultatif des Unités, le CCDM n'a pas à se prononcer.

On fait remarquer que les termes proposés en 1979 « ... les ondes électromagnétiques planes... » ont été changés en « ... la lumière... ». Cela a été suggéré durant les discussions du Groupe de travail de 1981 (Doc. 81-19), pour éviter les problèmes qui pourraient provenir de la masse au repos du photon ou de la quantification de l'espace. D'autres expressions telles que « ... onde lumineuse plane... » ont été proposées (Doc. 81-18, 82-4) mais on a admis que le terme le plus simple « ... la lumière... » est suffisamment précis et doit donc être préféré.

La question de savoir quel adjectif (plane, continue, infinie, etc.) pourrait être nécessaire pour qualifier la manière dont la radiation doit se propager a été discutée au cours de la session de 1979. A l'époque, on avait décidé d'utiliser seulement le terme « plane ». Si on utilisait d'autres termes pour être plus spécifique, cela pourrait faire croire, à tort, que la liste des conditions spécifiées est complète et suffisante. On fait encore remarquer que des ondes sphériques émanant d'un point-source se propagent avec la même vitesse que les ondes planes; il serait préférable qu'une telle propagation ne soit pas exclue par la définition (Doc. 82-13b). Ainsi, on arrive à la conclusion que même le terme « plane » n'est pas nécessaire. En l'absence d'adjectif qualificatif il devrait être clair pour tous que *la définition se réfère implicitement à la lumière se propageant d'une manière idéale, en l'absence de tout effet perturbateur.*

On discute ensuite le mot « vacuum ». En anglais, le terme « free space » est souvent utilisé pour indiquer un vide idéal mais aussi sans champ magnétique, électrique, gravitationnel ou autre. Il semble qu'il n'existe pas de terme équivalent en français. Les délégués de langue anglaise ne sont d'ailleurs pas d'accord entre eux pour savoir si le terme « free space » est toujours d'usage courant. On arrive à la conclusion que le terme pourrait être ambigu et que « vacuum » doit être conservé comme dans la rédaction provisoire.

En conclusion, le CCDM adopte la Recommandation M 1 (1982) (voir p. M 13 et la note du BIPM, p. M 13).

### Spécification pour la mise en pratique

Quoique la définition proposée indique spécifiquement que le mètre peut être réalisé en déterminant le temps de parcours de la lumière, il ne faut pas l'interpréter comme signifiant que c'est le seul, ou même le meilleur moyen de faire une mesure absolue de longueur. En fait, les moyens de mettre en œuvre la définition pour des mesures précises de laboratoire ne sont pas immédiatement évidents. Il est donc nécessaire de spécifier les méthodes qui permettent de réaliser le mètre, dans la pratique, en accord avec la nouvelle définition.

A la suite d'échanges de vues avec plusieurs membres du CCDM, le BIPM a préparé un projet qui spécifie deux moyens de réalisation :

1) A partir de la durée du trajet de la lumière en utilisant la relation  $l = c \cdot t$ .

2) Au moyen d'une longueur d'onde déterminée à partir de la fréquence par la relation  $\lambda = c/f$ .

Dans ce dernier cas, le document propose de recommander une liste de radiations de fréquence et de reproductibilité connues pour lesquelles il ne serait pas nécessaire de recommencer pour chaque mesure une détermination directe de fréquence.

On a passé un certain temps à discuter de quelle manière on doit faire référence à la liste de radiations recommandées. La difficulté est de trouver une formulation qui obéisse aux principes suivants :

a) La liste est destinée à compléter et non pas à empêcher ni à supplanter les mesures individuelles de fréquence qui pourraient être d'une plus grande exactitude.

b) La liste, ou une éventuelle version révisée et approuvée par le CCDM, doit être la seule à faire autorité.

c) Bien que l'objectif principal soit de donner une liste de fréquences recommandées de radiations de lasers asservis, à utiliser suivant la

méthode (2) ci-dessus, on doit laisser la possibilité d'utiliser des valeurs spécifiées de longueur d'onde, particulièrement celles des radiations émises par des tubes à décharge qui constituent actuellement des étalons de longueur d'onde ( $^{86}\text{Kr}$ ,  $^{198}\text{Hg}$ ,  $^{114}\text{Cd}$ ). (Si des valeurs de la fréquence devaient être indiquées pour ces sources, il y aurait des problèmes d'arrondi qui pourraient faire croire que les valeurs recommandées en 1962 devraient être changées.)

d) Les valeurs numériques et les incertitudes de la liste correspondent à des radiations de lasers asservis par des méthodes particulières et utilisés dans un certain domaine des paramètres expérimentaux. Elles peuvent ne pas s'appliquer à des lasers asservis par d'autres méthodes et elles ne s'appliquent pas sans précautions appropriées pour éviter les influences perturbatrices, en particulier celles qui peuvent provenir du système d'asservissement électronique utilisé. Il est donc nécessaire de se conformer au mode opératoire reconnu comme approprié pour asservir et faire fonctionner des lasers.

e) Les longueurs et les longueurs d'onde déterminées à partir de la valeur donnée de la vitesse de la lumière doivent être corrigées pour tenir compte des conditions réelles de propagation, par exemple de la limitation des dimensions latérales (diffraction, guides d'onde) ou des effets relativistes (les mesures doivent être limitées à une région où le potentiel gravitationnel peut être considéré comme constant dans un système inertiel de référence).

En conclusion, le CCDM adopte la Recommandation M 2 (1982) (voir p. M 15 et la note du BIPM, p. M 13).

### Liste des radiations recommandées

Au début de la session, un groupe de travail a été constitué pour examiner les nouveaux résultats présentés afin de mettre à jour le projet de liste des radiations recommandées (Doc. 82-4). Ce groupe de travail comprend des délégués des laboratoires suivants : BIPM, NBS/JILA, NPL, NRC, PTB et IMM. Sur proposition de Mr Kessler, on convient que ce groupe continuera son travail après la session, par correspondance centralisée au BIPM, afin de remettre la liste à jour, autant que possible, pour la réunion du CIPM en 1982 et pour celle qui aura lieu en 1983 avant la Conférence Générale. La révision finale devra être faite probablement au début de juin 1983.

Bien que le groupe de travail se soit réuni plusieurs fois, il ne lui a pas été possible de présenter un document complet avant la fin de la session. Il a pu, cependant, présenter un projet de texte et une liste de valeurs numériques, y compris quelques incertitudes, ainsi que les spécifications pour les paramètres de fonctionnement de deux systèmes de lasers. Ce

projet est discuté par le Comité au complet qui en approuve la forme générale. Plusieurs suggestions sont faites pour améliorer la formulation. Le groupe de travail en tiendra compte pour la rédaction des prochains documents. Les principaux éléments de la liste sont :

a) Cinq radiations de lasers asservis (de fréquence 88, 473, 489, 520, 582 THz).

b) Pour chaque système de laser on donne une brève liste des conditions expérimentales à respecter pour assurer la reproductibilité dans le domaine des incertitudes indiquées. (Quelques références d'articles illustrant la pratique reconnue comme appropriée doivent aussi être citées.)

c) L'incertitude est indiquée avec un niveau de confiance correspondant à trois fois l'écart-type de la moyenne estimé. Cette incertitude (en valeur relative) est de  $2 \times 10^{-10}$  pour la radiation infrarouge et de  $7 \times 10^{-10}$  à  $1,5 \times 10^{-9}$  pour les quatre radiations visibles.

d) Pour l'actuelle radiation étalon du krypton 86, seule la valeur de la longueur d'onde est indiquée en gardant l'incertitude relative de  $4 \times 10^{-9}$  admise en 1973.

e) Pour les sources à tube à décharge constituant les étalons secondaires recommandés en 1962, on a conservé les valeurs des longueurs d'onde et des incertitudes précédentes.

Dans le document 82-6, Mr Giacomo a soulevé un problème concernant la notation spectroscopique des transitions moléculaires utilisées pour l'asservissement des lasers. Il est d'usage courant d'employer une notation simplifiée servant à l'identification par référence à un schéma du spectre publié. Malheureusement, dans certains cas, deux formes de notation simplifiée ont été employées pour un même spectre; une notation conventionnelle qui pourrait être utilisée pour n'importe quelle nouvelle radiation a été suggérée (Doc. 82-32). Une notation formelle spécifiant les nombres quantiques n'est pas aisée à établir car quelques nombres quantiques perdent leur validité dans des circonstances particulières et un travail considérable peut être nécessaire pour déterminer les interactions de façon précise (Doc. 82-35). Il est convenu que les délégués devraient soumettre ce sujet à des spectroscopistes moléculaires et devraient essayer de se mettre d'accord suffisamment à temps pour la rédaction finale de la liste des radiations recommandées.

La liste des radiations recommandées comporte une note indiquant que d'autres transitions que celles spécifiées peuvent être utilisées si l'écart de fréquence par rapport à celles-ci est connu avec une exactitude suffisante; le but de cette note est de permettre l'emploi de différentes composantes hyperfines ou de différents isotopes. Une liste de tels écarts de fréquence a été publiée en Annexe au Rapport de la 5<sup>e</sup> session du CCDM en 1973. Une liste révisée provisoire a été présentée par le BIPM (Doc. 82-29). Mr Giacomo demande si les délégués pensent qu'une telle liste est utile et si elle doit être publiée. La liste est jugée très précieuse et on décide qu'elle

devra être publiée après sa mise à jour. Les délégués sont priés de communiquer au BIPM les valeurs récentes pour qu'elles puissent être incluses dans cette liste (*voir* p. M 65).

### Tâches futures du BIPM et du CCDM

Les membres du CCDM sont instamment priés de faire connaître au BIPM les résultats de leurs mesures de fréquence et de longueur d'onde avant la fin de mai 1983 de façon que la liste des radiations recommandées jointe aux Recommandations de la nouvelle définition puisse être mise à jour avant d'être présentée à la CGPM. (Il serait particulièrement précieux d'avoir de nouveaux résultats de mesures de fréquence de radiations visibles.) Le CCDM pourra ainsi approuver, par correspondance, la liste révisée.

La mise en application de la nouvelle définition ne devrait pas poser de problème important, de sorte qu'il est improbable que le CCDM doive se réunir à nouveau avant 1985 ou 1986 pour examiner la situation. En attendant, cependant, on peut prévoir une extension des travaux concernant les lasers. En particulier, il est probable que de nombreuses comparaisons de lasers seront demandées au BIPM. Ce travail s'ajoutera aux mesures des étalons tels que règles, calibres et fils géodésiques qui continueront à être les étalons de référence de beaucoup de laboratoires de métrologie.

Il est nécessaire que le BIPM participe activement à ces travaux sur les lasers mais l'étendue de sa participation n'est pas encore très bien définie. L'un de ses premiers devoirs sera de maintenir l'uniformité de l'unité de longueur en maintenant en service des lasers asservis des différents types et en effectuant avec eux des comparaisons internationales. Le problème se pose de savoir combien de types de lasers il faut envisager car il est difficilement possible de maintenir plusieurs exemplaires de chaque type. Les facteurs qui influencent la reproductibilité des lasers ont souvent été mis en évidence lors de comparaisons internationales. Le BIPM est donc bien placé pour entreprendre des recherches sur ces facteurs. Il pourrait être judicieux aussi pour le BIPM de prendre part aux mesures concernant la chaîne de raccordement de fréquence, ou de mettre en œuvre des techniques de mélange de fréquences pour la comparaison de radiations de lasers dans le visible; mais ceci n'est pas encore très clair. Contrairement à d'autres activités, les travaux sur les lasers sont en expansion et de nombreux développements nouveaux sont à prévoir.

Ce qui est certain, c'est que l'espace disponible au BIPM pour les travaux sur les lasers est trop restreint. Les laboratoires disponibles sont mal adaptés pour les comparaisons internationales et n'offrent pas assez de place pour conserver dans de bonnes conditions des lasers de référence

entre ces comparaisons, de sorte que les recherches sur la reproductibilité se trouvent sérieusement entravées. Constatant cette situation, le CCDM adopte la Recommandation M 3 (1982) (*voir* p. M 18).

### Comparaisons internationales de règle et d'étalons d'angle

La comparaison internationale des mesures d'une règle divisée de 1 m qui a débuté en 1976 touche à sa fin. Seules les mesures au CSIRO (Australie) et à l'OFMET (Suisse) restent à faire. Un rapport sur les résultats déjà obtenus est présenté par le BIPM (Doc. 82-18); dans ce rapport, un diagramme comparatif illustre les résultats de la mesure de l'intervalle principal. Ces résultats sont quelque peu décevants, avec des différences supérieures à trois fois l'écart-type. Pour une bonne part, la cause de cette dispersion des résultats est probablement la qualité de la règle : traçage des traits, planéité de la surface, etc. Le BIPM a un excellent équipement pour la mesure des règles. Il présente quelques résultats relatifs à l'étude d'une réglette de 20 cm; celle-ci porte plusieurs graduations dont les traits ont des largeurs différentes (Doc. 82-19a). Il apparaît clairement qu'avec l'appareillage du BIPM les résultats les plus reproductibles sont obtenus avec les traits les plus fins.

Le NRLM présente un rapport (Doc. 82-42) sur le déroulement de la comparaison internationale d'étalons d'angle qui a débuté en 1979. Onze laboratoires prennent part à cette comparaison; quatre ont déjà terminé les mesures. L'un des deux polygones a été légèrement endommagé au NPL et l'une de ses faces doit être cachée sur un cinquième de sa surface. Le NRLM, laboratoire pilote, va réviser le plan de circulation pour les laboratoires suivants.

### Questions diverses

Quelques développements de techniques intéressant les membres du CCDM sont discutés.

Mr Hall décrit une méthode qui permet d'améliorer la résolution des comparaisons de longueur d'onde avec un interféromètre à chariot mobile (lambdamètre); en prenant de nombreuses données pendant le déplacement du chariot, une résolution de  $1 \times 10^{-11}$  en valeur relative pourrait être atteinte en 1 seconde. Il attire aussi l'attention sur un type de laser asservi utilisant un laser commercial bon marché et l'effet Zeeman qui permet une reproductibilité d'environ  $2 \times 10^{-9}$ . Mr Hall mentionne encore une technique de modulation qui améliore le rapport signal/bruit pour l'asservissement des lasers.

Mr Helmcke discute d'un travail sur des méthodes où l'on réduit le déplacement Doppler dans les études sur des jets atomiques en sélectionnant un petit groupe de vitesses ce qui permet le calcul du déplacement Doppler du second ordre.

Mr Baird demande s'il y aurait possibilité pour le BIPM d'organiser des conférences techniques sur des sujets concernant le CCDM. Plusieurs délégués seraient d'avis favorable mais considèrent qu'un séminaire serait plus approprié qu'une conférence. Mr Giacomo doute que le BIPM ait les ressources suffisantes pour organiser des conférences en plus des Comités existants. Il indique que, néanmoins, le BIPM serait heureux de participer à un tel séminaire organisé par un laboratoire membre et est d'avis qu'il pourrait très bien avoir lieu à l'occasion d'une réunion internationale.

\*  
\* \*

Pour clore la session, le Président souligne l'importance de la décision qui a été prise. Il souligne aussi la simplicité et la clarté de la nouvelle définition proposée. Il remercie les participants pour leur contribution aux discussions, le groupe de travail pour ses efforts constructifs et le BIPM pour l'excellente préparation de cette session.

Au nom des participants, Mr Kessler remercie aussi le BIPM pour son hospitalité et félicite le Président pour la façon dont il a dirigé la 7<sup>e</sup> session du CCDM.

25 juin 1982

**Recommandations  
du Comité Consultatif pour la Définition du Mètre  
présentées  
au Comité International des Poids et Mesures**

*Note du BIPM :*

Lors de sa 8<sup>e</sup> session qui s'est tenue les 8 et 9 juin 1982, le Comité Consultatif des Unités (CCU) a examiné les Recommandations adoptées par le CCDM. Il a apporté deux modifications mineures au texte des *Considérants* de la Recommandation M 1 et à celui de la liste des radiations recommandées; par contre, il a apporté des amendements plus importants à la Recommandation M 2.

Ultérieurement, Mr Kind a réuni un groupe de travail à l'occasion de la Conférence on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 1982) (28 juin-1<sup>er</sup> juillet) à Boulder. Ce groupe de travail a estimé que les amendements proposés par le CCU améliorent la forme des recommandations sans en altérer le sens. Il a, lui-même, apporté deux nouveaux amendements rédactionnels à la Recommandation M 2 et a proposé d'ajouter un paragraphe d'introduction au début de la « Liste des radiations recommandées, 1982 ».

Ces modifications et amendements ont été acceptés par correspondance par les membres du CCDM et du CCU.

Lors de sa 71<sup>e</sup> session, en octobre 1982, le Comité International des Poids et Mesures (CIPM) a apporté de légères modifications rédactionnelles aux Recommandations M 1 et M 2, qui sont devenues les projets de résolutions A et B soumis à la 17<sup>e</sup> Conférence Générale des Poids et Mesures (octobre 1983).

Le texte des Recommandations qui suivent est le texte définitif adopté par le CIPM.

Les données utilisées pour établir la liste des radiations recommandées sont indiquées dans l'Annexe M 4 (p. M. 53).

---

Sur une nouvelle définition du mètre

RECOMMANDATION M 1 (1982)

Le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre,

*rappelant* sa Recommandation M 2 (1979) et

*considérant :*

1) que la définition actuelle ne permet pas une réalisation du mètre suffisamment précise pour tous les besoins;

2) que les progrès réalisés dans l'asservissement des lasers permettent d'obtenir des radiations plus reproductibles et plus faciles à utiliser que la radiation étalon émise par une lampe à krypton 86;

3) que les progrès réalisés dans la mesure des fréquences et des longueurs d'onde de ces radiations ont abouti à des déterminations concordantes de la vitesse de la lumière dont l'exactitude est limitée principalement par la réalisation du mètre dans sa définition actuelle;

4) que les valeurs des longueurs d'onde déterminées à partir de mesures de fréquence et d'une valeur donnée de la vitesse de la lumière ont une précision supérieure à celle qui peut être obtenue par comparaison avec la longueur d'onde de la radiation étalon du krypton 86;

5) qu'il y a avantage, notamment pour l'astronomie et la géodésie, à maintenir inchangée la valeur de la vitesse de la lumière recommandée en 1975 par la 15<sup>e</sup> Conférence Générale des Poids et Mesures, dans sa Résolution 2 ( $c = 299\,792\,458$  m/s);

6) qu'une nouvelle définition du mètre a été envisagée sous diverses formes qui ont toutes pour effet de donner à la vitesse de la lumière une valeur exacte, égale à la valeur recommandée, et que cela n'introduit aucune discontinuité appréciable de l'unité de longueur, compte tenu de l'incertitude relative de  $\pm 4 \times 10^{-9}$  des meilleures réalisations du mètre dans sa définition actuelle;

7) que ces diverses formes, faisant appel soit au trajet parcouru par la lumière dans un intervalle de temps spécifié, soit à la longueur d'onde d'une radiation de fréquence mesurée ou de fréquence spécifiée, ont fait l'objet de consultations et de discussions approfondies, qu'elles ont été reconnues équivalentes et qu'un consensus s'est dégagé en faveur de la première forme;

8) que le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre est dès maintenant en mesure de donner des instructions pour la mise en pratique d'une telle définition, instructions qui pourront inclure l'emploi de la radiation orangée du krypton 86 utilisée jusqu'ici comme étalon et qui pourront être complétées ou révisées par la suite;

*recommande*

— que le mètre soit défini comme suit :

« Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de  $1/299\,792\,458$  de seconde »;

— que la définition du mètre en vigueur depuis 1960, fondée sur la transition entre les niveaux  $2p_{10}$  et  $5d_5$  de l'atome de krypton 86, soit abrogée.

Mise en pratique de la définition du mètre (dans l'hypothèse de l'adoption par la CGPM d'une définition conforme à la Recommandation M 1 (1982))

RECOMMANDATION M 2 (1982)

Le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre

*recommande*

— que le mètre soit réalisé par l'une des méthodes suivantes :

a) au moyen de la longueur  $l$  du trajet parcouru dans le vide par une onde électromagnétique plane pendant la durée  $t$ ; cette longueur est obtenue à partir de la mesure de la durée  $t$ , en utilisant la relation  $l = c \cdot t$  et la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide  $c = 299\,792\,458$  m/s;

b) au moyen de la longueur d'onde dans le vide  $\lambda$  d'une onde électromagnétique plane de fréquence  $f$ ; cette longueur d'onde est obtenue à partir de la mesure de la fréquence  $f$ , en utilisant la relation  $\lambda = c/f$  et la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide  $c = 299\,792\,458$  m/s;

c) au moyen de l'une des radiations de la liste ci-dessous, radiations pour lesquelles on peut utiliser la valeur donnée de la longueur d'onde dans le vide ou de la fréquence, avec l'incertitude indiquée, pourvu que l'on observe les conditions spécifiées et le mode opératoire reconnu comme approprié;

— et que dans tous les cas les corrections nécessaires soient appliquées pour tenir compte des conditions réelles telles que diffraction, gravitation ou imperfection du vide.

N. B. — Les valeurs numériques ci-dessous doivent être considérées comme provisoires en ce qui concerne le dernier chiffre significatif; la liste ne sera définitive qu'après adoption et publication par le CIPM.

(Voir Annexe M 4 : Données utilisées pour établir la liste des radiations recommandées, 1982 et bibliographie commentée. Voir aussi Annexe M 5 : Intervalles de fréquence entre composantes hyperfines de raies d'absorption de l'iode.)

LISTE DES RADIATIONS RECOMMANDÉES, 1982

Dans cette liste, les valeurs de la fréquence  $f$  et de la longueur d'onde  $\lambda$  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  $\lambda$  sont arrondies.

1. — *Radiations de lasers asservis sur des raies d'absorption saturée* \*

1.1. — Molécule absorbante  $\text{CH}_4$ , transition  $\nu_3$ , P(7), composante  $F_2^{(2)}$ .

Les valeurs  $f = 88\,376\,181\,608$  kHz

$\lambda = 3\,392\,231\,397,0$  fm

avec une incertitude globale relative estimée de  $\pm 1,3 \times 10^{-10}$  [qui résulte d'un écart-type estimé de  $0,44 \times 10^{-10}$  en valeur relative] s'appliquent à la radiation émise par un laser à He-Ne asservi à l'aide d'une cellule à méthane, située à l'intérieur ou à l'extérieur du laser, lorsque les conditions suivantes sont respectées dans la cellule :

- pression du méthane  $\leq 3$  Pa,
- puissance surfacique moyenne sur l'axe transportée par les faisceaux, dans un seul sens, à l'intérieur de la cavité \*\*  $\leq 10^4$  W/m<sup>2</sup>,
- rayon de courbure des surfaces d'onde  $\geq 1$  m,
- différence relative de puissance entre les deux ondes qui se propagent en sens inverse l'une de l'autre  $\leq 5$  %.

1.2. — Molécule absorbante  $^{127}\text{I}_2$ , transition 17-1, P(62), composante o.

Les valeurs  $f = 520\,206\,808,51$  MHz  
 $\lambda = 576\,294\,760,27$  fm

avec une incertitude globale relative estimée\*\*\* de  $\pm 6 \times 10^{-10}$  [qui résulte d'un écart-type estimé de  $2 \times 10^{-10}$  en valeur relative] s'appliquent à la radiation émise par un laser à colorant (ou à la radiation émise par un laser à He-Ne et doublée en fréquence) asservi à l'aide d'une cellule à iode, située à l'intérieur ou à l'extérieur du laser, ayant un point froid à la température de  $6^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ .

1.3. — Molécule absorbante  $^{127}\text{I}_2$ , transition 11-5, R(127), composante i.

Les valeurs  $f = 473\,612\,214,8$  MHz  
 $\lambda = 632\,991\,398,1$  fm

avec une incertitude globale relative estimée de  $\pm 1 \times 10^{-9}$  [qui résulte d'un écart-type estimé de  $3,4 \times 10^{-10}$  en valeur relative] s'appliquent à la radiation émise par un laser à He-Ne asservi à l'aide d'une cellule à iode intérieure au laser, lorsque les conditions suivantes sont respectées :

- température des parois de la cellule comprise entre  $16^\circ\text{C}$  et  $50^\circ\text{C}$  avec un point froid à  $15^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ,
- puissance moyenne transportée par les faisceaux dans un seul sens, à l'intérieur de la cavité \*\*  $20$  mW  $\pm 5$  mW,
- modulation de la fréquence, amplitude de crête à creux  $6$  MHz  $\pm 1$  MHz.

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

Les valeurs  $f = 489\,880\,355,1$  MHz  
 $\lambda = 611\,970\,769,8$  fm

avec une incertitude globale relative estimée de  $\pm 1,1 \times 10^{-9}$  [qui résulte d'un écart-type estimé de  $3,7 \times 10^{-10}$  en valeur relative] s'appliquent à la radiation émise par un laser à He-Ne asservi à l'aide d'une cellule à iode, située à l'intérieur ou à l'extérieur du laser, ayant un point froid à la température de  $5^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ .

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

$$\begin{aligned} \text{Les valeurs } f &= 582\,490\,603,6 \text{ MHz} \\ \lambda &= 514\,673\,466,2 \text{ fm} \end{aligned}$$

avec une incertitude globale relative estimée de  $\pm 1,3 \times 10^{-9}$  [qui résulte d'un écart-type estimé de  $4,3 \times 10^{-10}$  en valeur relative] s'appliquent à la radiation émise par un laser à  $\text{Ar}^+$  asservi à l'aide d'une cellule à iode, située à l'intérieur ou à l'extérieur du laser, ayant un point froid à la température de  $-5^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ .

### Notes

\* 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. Des détails sur les méthodes d'asservissement sont décrits 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.

\*\* La puissance transportée par les faisceaux, 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.

\*\*\* Cette incertitude, de même que les valeurs de  $f$  et de  $\lambda$ , est fondée sur la moyenne pondérée de deux déterminations seulement. Cependant, la plus précise de ces deux déterminations a été obtenue exclusivement par multiplication et mélange de fréquences à partir de la radiation précédente (paragraphe 1.1).

## 2. — Radiations de lampes spectrales

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

$$\text{La valeur } \lambda = 605\,780\,210,2 \text{ fm}$$

avec une incertitude globale relative estimée de  $\pm 4 \times 10^{-9}$  [qui résulte d'un écart-type estimé de  $1,3 \times 10^{-9}$  en valeur relative] s'applique à la radiation émise par une lampe utilisée dans les conditions recommandées par le CIPM (*Procès-Verbaux CIPM*, 49<sup>e</sup> session, 1960, pp. 71-72 et *Comptes Rendus 11<sup>e</sup> CGPM*, 1960, p. 85).

2.2. — Les radiations des atomes de  $^{86}\text{Kr}$ ,  $^{198}\text{Hg}$  et  $^{114}\text{Cd}$  recommandées par le CIPM en 1963 (*Comité Consultatif pour la Définition du Mètre*, 3<sup>e</sup> session, 1962, pp. 18-19 et *Procès-Verbaux CIPM*, 52<sup>e</sup> session, 1963, pp. 26-27) avec les valeurs indiquées pour leur longueur d'onde et pour l'incertitude correspondante.

Travaux sur les lasers au BIPM

RECOMMANDATION M 3 (1982)

Le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre,

*considérant*

— que les lasers prennent rapidement une importance croissante pour la métrologie des longueurs;

— que les demandes d'étalonnages et de comparaisons de lasers se multiplieront par suite de la nouvelle définition proposée pour le mètre;

— que, pour être en mesure d'effectuer ce travail, il est nécessaire de disposer de locaux convenables et d'un personnel de qualité suffisamment nombreux;

— que les travaux sur les lasers sont venus s'ajouter à la métrologie traditionnelle des longueurs;

— que les laboratoires disponibles au BIPM pour ces travaux sur les lasers sont insuffisants pour les besoins actuels;

— qu'un projet de construction d'un nouveau laboratoire pour les lasers est en cours d'étude;

*recommande*

— que la construction du nouveau laboratoire pour les lasers soit approuvée et entreprise dès que possible;

— que les mesures appropriées soient prises pour remédier au manque de personnel dans la section des lasers.

---

ANNEXE M 1

---

**Documents de travail présentés  
à la 7<sup>e</sup> Session du CCDM**

---

Ces documents de travail, qu'ils soient ou non publiés, peuvent être obtenus dans leur langue originale sur demande adressée au BIPM.

Document  
CCDM/

- 80-1 NBS (États-Unis d'Amérique). — Proposition d'une définition du mètre, by K. G. Kessler.
- 80-2 L. FRENKEL. — Commentaires sur la définition du mètre.
- 80-3 CSIRO (Australie). — Commentaires sur le document 80-1, by W. R. Blevin.
- 80-4 D. T. GOLDMAN. — Proposed new definition of the meter.
- 80-5 Extrait du Rapport du Comité Consultatif des Unités (mai 1980).
- 80-6 J. TERRIEN. — Formulation de la future définition du mètre.
- 81-1 NPL (Royaume-Uni). — Commentaires de W. R. C. Rowley sur les documents précédents.
- 81-2 A. H. COOK. — Commentaires sur la définition du mètre.
- 81-3 Ordre du jour du Groupe de travail *ad hoc* CCDM/CCU.
- 81-4 Extrait du Rapport de la 7<sup>e</sup> Session du Comité Consultatif des Unités.
- 81-5 Définitions possibles du mètre (résumé pour le Groupe de travail CCDM/CCU).
- 81-6 BIPM. — Compléments à la définition du mètre, par P. Giacomo.

- 81-7 NRLM (Japon). — Commentaires de M. Kawata sur la définition du mètre.
- 81-8 P. BOUCHARÉINE. — La définition de l'unité de longueur, *Bull. BNM*, **43**, janv. 1981.
- 81-9 CSIRO (Australie). — Ciddor, P. E. and Blevin, W. R., Redefining the metre — A request for comments, *Austr. Physicist*, **18**, March 1981.
- 81-10 NBS (États-Unis d'Amérique). — The definition of the metre.
- 81-11 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — Comment for the session of the CCDM/CCU Working Group in April 1981.
- 81-12 NIM (Rép. Pop. de Chine). — Opinion sur la définition du mètre.
- 81-13 NRC (Canada). — Submission to the joint CCDM/CCU meeting on the new definition of the metre.
- 81-14 NPL (Royaume-Uni). — Decision table.
- 81-15 W. R. BLEVIN. — The Australian viewpoint on the new definition of the metre.
- 81-16 L. FRENKEL. — Proposition d'une définition du mètre.
- 81-17 NRLM (Japon). — About the source of deviation in the measured values of line standard.
- 81-18 NRLM (Japon). — Opinion sur la définition du mètre.
- 81-19 W. R. C. ROWLEY. — Rapport au Comité International des Poids et Mesures du Groupe de travail *ad hoc* CCDM/CCU d'avril 1981.
- 82-1 NPL (Royaume-Uni). — Frequency dependence of a 633 nm He-Ne laser stabilized by  $^{127}\text{I}_2$ , upon iodine pressure, modulation amplitude and wall temperature (*NPL report MOM 54*, Sept. 1981), by W. R. C. Rowley.
- 82-2 NPL (Royaume-Uni). — Beat frequency measurements  $^{129}\text{I}_2(k) - ^{127}\text{I}_2(i)$ , by W. R. C. Rowley.
- 82-3 BIPM. — Questionnaire.
- 82-4 BIPM. — Avant-projet de Recommandations et Annexe.
- 82-5 CSIRO (Australie).
- a. Commentaires sur l'avant-projet de Recommandation du BIPM;
  - b. Réponse au questionnaire.

- 82-6 BIPM. — Notation spectroscopique pour les radiations recommandées, par P. Giacomo.
- 82-7 ASMW (Rép. Dém. Allemande). — Prise de position sur une redéfinition du mètre.
- 82-8 NRC (Canada). — Progress at NRC on measurement of optical standards of frequency.
- 82-9 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). —  
*a.* Comments to Draft Recommendation M 2 (1982) in the document CCDM/82-4;  
*b.* Response to the questionnaire CCDM/82-3.
- 82-10 NPL (Royaume-Uni). —  
*a.* Reply to questionnaire CCDM/82-3.  
*b.* Comments on CCDM/82-4 (Draft Recommendations M 1 and M 2 (1982)).  
*c.* Recent measurements of wavelengths and reproducibilities of stabilized lasers, by W. R. C. Rowley, S. J. Bennett, P. Gill, B. R. Marx and G. P. Barwood.
- 82-11 NRC (Canada). — Response to CCDM questionnaire CCDM/82-3.
- 82-12 NIM (Rép. Pop. de Chine). —  
*a.* Réponse au questionnaire.  
*b.* Measurement on the dependence of frequency and spectral width upon iodine pressure, modulation amplitude and output power of 633 nm  $^{127}\text{I}_2$  stabilized He-Ne lasers, by Shen Naicheng.
- 82-13 INM (France). —  
*a.* Réponse au questionnaire CCDM/82-3.  
*b.* Commentaire sur le document CCDM/82-4.
- 82-14 NBS (États-Unis d'Amérique). —  
*a.* National Bureau of Standards response to questionnaire CCDM/82-3.  
*b.* Absolute-frequency measurements of the 520 THz hyperfine components of iodine and the 260 THz emission of neon, by C. R. Pollock, D. A. Jennings, F. R. Petersen, J. S. Wells, R. E. Drullinger, E. C. Beaty and K. M. Evenson.  
*c.* Frequency differences of 2.5 THz in the visible measured with MIM diodes, by R. E. Drullinger, K. M. Evenson,

- D. A. Jennings, F. R. Petersen, J. C. Bergquist and Lee Burkins [NBS] and H. U. Daniel [Max Planck Institut für Quantenoptik, Fed. Rep. of Germany].
- d. H. P. LAYER, W. R. C. ROWLEY and B. R. MARX, NPL-NBS. — Iodine-stabilized helium-neon laser intercomparison, *Optics Letters*, **6**, No. 4, 1981, 188-191.
- 82-15 NPL (Royaume-Uni). — Definition of the SI base units.
- 82-16 ASMW (Rép. Dém. Allemande). — Réponse au questionnaire CCDM/82-3.
- 82-17 IMGC (Italie). —
- a. Lettre: Commentaire sur une nouvelle définition du mètre.
  - b. Answers to the CCDM questionnaire.
- 82-18 BIPM. — Point 3 de l'ordre du jour: comparaisons internationales.
- 82-19 BIPM. —
- a. Réponse au questionnaire.
  - b. Results of international comparisons using methane stabilized He-Ne lasers at 3.39  $\mu\text{m}$  and iodine stabilized He-Ne lasers at 633 nm, by J.-M. Chartier.
  - c. Frequency shifts at low iodine pressure of  $^{127}\text{I}_2$  stabilized He-Ne lasers at 633 nm wavelength, by M. Gläser.
- 82-20 NRLM (Japon). — Reply to questions in CCDM/82-3.
- 82-21 K. SHIMODA. — Lettre.
- 82-22 CSMU (Tchécoslovaquie). —
- a. Commentaire sur l'avant-projet de recommandation.
  - b. Réponses au sujet du document CCDM/82-3.
- 82-23 CIOP (Rép. Argentine). — Réponse au questionnaire.
- 82-24 IMM (U.R.S.S.). —
- a. Réponses de l'IMM au questionnaire.
  - b. Observations sur le projet des Recommandations.
- 82-25 NBS (États-Unis d'Amérique). — Réponse de K. G. Kessler au document CCDM/82-6: notation spectroscopique.
- 82-26 BIPM. — Résumé des réponses au questionnaire.

- 82-27 NIM, Beijing University (Rép. Pop. de Chine) et BIPM. — International intercomparison of He-Ne lasers stabilized on the saturated absorption of  $^{127}\text{I}_2$  at  $\lambda = 633$  nm and of  $\text{CH}_4$  at  $\lambda = 3.39$   $\mu\text{m}$ , by N. C. Shen, C. Y. Li, Y. M. Sun, C. Wang, J.-M. Chartier and R. Felder.
- 82-28 CSMU (Tchécoslovaquie) et BIPM. — The comparison of the 633 nm iodine-stabilized He-Ne lasers of the Czechoslovak Institute of Metrology, in BIPM, by J. Blabla, J. Smydke, J.-M. Chartier and M. Gläser.
- 82-29 BIPM. — Intervalles de fréquence entre les raies d'absorption de  $\text{I}_2$  coïncidant avec les raies d'émission des lasers à  $\text{Ar}^+$  ( $\lambda = 515$  nm) et à He-Ne ( $\lambda = 612$  nm et 633 nm).
- 82-30 NBS (États-Unis d'Amérique). — Measurement of frequencies in the visible and near I.R.
- 82-31 BIPM. — Raies perturbatrices dans les lasers asservis sur l'iode.
- 82-32 M. GLÄSER (BIPM). — Proposition pour la nomenclature des composantes hyperfines de l'iode.
- 82-33 BIPM et IMGC (Italie). — Comparaison internationale de lasers à He-Ne asservis sur l'iode, en cuve interne, à  $\lambda = 612$  nm, par R. Felder et F. Bertinetto.
- 82-34 NPL (Royaume-Uni). — Laser wavelength measurements.
- 82-35 NPL (Royaume-Uni). —  $\text{I}_2$  spectroscopic notation for recommended laser wavelengths, by P. Gill.
- 82-36 CSMU (Tchécoslovaquie). — The standpoint of CSMU on the redefinition of the metre.
- 82-37 CSMU (Tchécoslovaquie). — The iodine stabilized helium-neon lasers in CSMU since 1979.
- 82-38 NRLM (Japon). — Recent activities of NRLM in the absolute wavelength and frequency measurements, by K. Tanaka, T. Sakurai, N. Ito, T. Kurosawa, A. Morinaga and S. Iwasaki.
- 82-39 IMGC (Italie). — Corrections to IMGC answers to CCDM questionnaire (Doc. 82-17b).
- 82-40 M. GARAVAGLIA. — Comments on draft recommendations M 1 and M 2 (1982).

- 82-41 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — Wavelength comparison between methane and iodine stabilized He-Ne lasers, by G. Bönsch.
- 82-42 NRLM (Japon). — International comparison of angle standards.
- 82-43 JILA (États-Unis d'Amérique). — Response to document CCDM/82-3.
-

## ANNEXE M 2

---

### Consultation préalable par correspondance

---

- A — Questionnaire adressé par le BIPM aux membres du CCDM le 26 février 1982.
- B — Résumé des réponses à ce questionnaire.
- 

## M 2A

### Questionnaire sur les résultats obtenus depuis 1979

---

#### 1. Mesures de fréquence

- 1.1. — Avez-vous fait des mesures absolues de fréquence de radiations de lasers du spectre visible ou du proche infrarouge ?
- 1.2. — Avez-vous mesuré le rapport de fréquence de radiations lasers ?
- 1.3. — Avez-vous des résultats concernant des comparaisons de radiations de lasers de laboratoires différents (excepté les comparaisons faites avec le BIPM) ?
- 1.4. — En vue de mettre à jour et de compléter les tableaux publiés en 1973 (*CCDM 1973*, pages M 25, M 26) :
- 1.4.1. — Avez-vous fait, avec des lasers à He-Ne ( $\lambda = 612$  nm et  $\lambda = 633$  nm), des mesures d'intervalles de fréquence

entre composantes de l'iode 127, de l'iode 129 et aussi entre les composantes de référence des trois groupes suivants :  $^{129}\text{I}_2$  ( $^{22}\text{Ne}$ ),  $^{129}\text{I}_2$  ( $^{20}\text{Ne}$ ),  $^{127}\text{I}_2$  ( $^{20}\text{Ne}$ ) ?

1.4.2. — Même question pour les lasers à argon et, éventuellement, pour d'autres lasers.

## 2. Mesures de longueur d'onde

- 2.1. — Avez-vous fait des comparaisons interférentielles de longueurs d'onde de radiations de lasers ?
- 2.2. — Avez-vous étudié certains termes correctifs tels que ceux dus à l'indice de réfraction de l'air et à la diffraction ?

## 3. Reproductibilité

Quels sont, à votre avis, les incertitudes à admettre pour les longueurs d'onde ou les fréquences recommandées et quelles sont les conditions de réalisation à spécifier afin de ne pas dépasser ces incertitudes ?

- 3.1. — pour les lasers asservis sur le méthane,  $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ ;
- 3.2. — pour les lasers asservis sur l'iode,  $\lambda = 515 \text{ nm}$ ,  $612 \text{ nm}$ ,  $633 \text{ nm}$ ;
- 3.3. — pour d'autres lasers, éventuellement.

## 4. Étalons matériels

Avez-vous à signaler des progrès dans la fabrication ou la mesure des étalons de longueur à traits ou à bouts et des étalons d'angle ?

---

M 2B

## Résumé des réponses au questionnaire

Ce résumé est extrait des documents suivants :

CCDM/82- 5b : CSIRO (Australie)  
/82- 9b : PTB (Rép. Féd. d'Allemagne)

- /82-11 : NRC (Canada)
- /82-12a : NIM (Rép. Pop. de Chine)
- /82-13a : INM (France)
- /82-14a : NBS (États-Unis d'Amérique)
- /82-16 : ASMW (Rép. Dém. Allemande)
- /82-17b : IMGCI (Italie)
- /82-19a : BIPM
- /82-20 : NRLM (Japon)
- /82-22b : CSMU (Tchécoslovaquie)
- /82-24a : IMM (U.R.S.S.)

et des documents remis en séance :

- CCDM/82-30 : NBS
- /82-43 : JILA (États-Unis d'Amérique)

## 1. Mesures de fréquence

1.1. — *Avez-vous fait des mesures absolues de fréquence de radiations de lasers du spectre visible ou du proche infrarouge ?*

PTB : Mesures en cours de la fréquence du laser asservi sur le méthane.

NPL : La fréquence du laser asservi sur le méthane à  $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$  a été mesurée :  $(88\,376\,181\,616 \pm 3) \text{ kHz}$  [KNIGHT, D. J. E., EDWARDS, G. J., PEARCE, P. R. and CROSS, N. R., Measurement of the frequency of the 3.39  $\mu\text{m}$  methane-stabilized laser to  $\pm 3$  parts in  $10^{11}$ , *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **IM-29**, No. 4, 1980, pp. 257-264].

NRC : WHITFORD, B. G., Measurement of the Absolute Frequencies of  $\text{CO}_2$  Laser Transitions, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-29**, 1960, pp. 168-176.

BAIRD, K. M., EVENSON, K. M., HANES, G. R., JENNINGS, D. A. and PETERSEN, F. R., *Optics Letters*, **4**, 1979, pp. 263-4.

WHITFORD, B. G., Absolute Frequencies of  $\text{CO}_2$  Laser Transitions by Multiplication of  $\text{CO}_2$  Laser Difference Frequencies, *Optics Comm.*, **31**, 1979, pp. 363-366.

BAIRD, K. M., SMITH, D. S. and WHITFORD, B. G., Confirmation of the Currently Accepted Value 299 792 458 Metres per Second for the Speed of Light, *Optics Comm.*, **31**, 1979, pp. 367-368.

NIM : Programme en cours de réalisation avec lasers à He-Ne asservis sur l'iode ( $\lambda = 633$  et  $612 \text{ nm}$ ), asservis sur le méthane ( $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ ), laser à  $\text{CO}_2$  et laser à alcool méthylique pompé optiquement ( $\lambda = 70,5 \mu\text{m}$ ).

INM : On a mesuré la fréquence du laser asservi sur le méthane à  $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$  :  $(88\ 376\ 181\ 612 \pm 11)$  kHz.

On a aussi mesuré, en 1980, les fréquences d'une vingtaine de raies d'absorption saturée de  $^{192}\text{OsO}_4$  et  $\text{SF}_6$  (CLAIRON, A., van LERBERGHE, A., BRÉANT, Ch., SALOMON, Ch., CAMY, G. and BORDÉ, Ch. J., Towards a New Absolute Frequency Reference Grid in the 28 THz Range, *Opt. Comm.*, **35**, 3, 1980, pp. 368-372).

IMGC : Projet, en cours, de mesure de la fréquence du laser asservi sur le méthane.

NRLM : Un système pour mesurer la fréquence du laser à  $\text{CO}_2$  est en cours de préparation; il comprend des klystrons à fréquence asservie, un laser à alcool pompé optiquement (251  $\mu\text{m}$ , 10 mW), un laser à vapeur d'eau (28  $\mu\text{m}$ , 50 à 200 mW) et un laser à  $\text{CO}_2$  (9,3  $\mu\text{m}$ , 0,5 W); les mesures de battements sont faites à l'aide de diodes à point de contact tungstène-nickel.

IMM : On a fait des mesures absolues de la fréquence du laser He-Ne stabilisé sur la composante  $F_2^{(2)}$  du méthane :  $f = (88\ 376\ 181\ 603,4 \pm 1,4)$  kHz [DOMNINE, Y. S., KOCHELYAEVSKY, N. B., TATARENKOV, V. M. et CHOUMYATSKY, P. S., *JETP Letters*, **34**, pub. 4, 1981, pp. 175-178].

NBS : En prenant comme référence la valeur de la fréquence de la raie du méthane  $(88\ 376\ 181\ 609 \pm 9)$  kHz, on a mesuré les fréquences suivantes :

$$^{127}\text{I}_2 \text{ composante i} \quad \left\{ \begin{array}{l} f = 473\ 612\ 214\ 789 \text{ kHz} \\ \lambda = 632,991\ 398\ 107 \text{ nm} \end{array} \right.$$

de la raie 11-5 R(127)

$$^{127}\text{I}_2 \text{ composante g} \quad \left\{ \begin{array}{l} f = 473\ 612\ 340\ 492 \text{ kHz} \\ \lambda = 632,991\ 230\ 099 \text{ nm} \end{array} \right.$$

de la raie 11-5 R(127)

$$^{127}\text{I}_2 \text{ composante o} \quad \left\{ \begin{array}{l} f = 520\ 206\ 808\ 547 \text{ kHz} \\ \lambda = 576,294\ 760\ 227 \text{ nm} \end{array} \right.$$

de la raie 17-1 P(62)

$$^{20}\text{Ne, Lamb dip } 1,15 \mu\text{m} \quad \left\{ \begin{array}{l} f = (260\ 103\ 249\ 260 \pm 100) \text{ kHz} \\ \lambda = 1\ 152,590\ 207\ 36 \text{ nm} \end{array} \right.$$

$$\text{Raie } R_1(26) \text{ de } ^{13}\text{C } ^{18}\text{O}_2 \quad \left\{ \begin{array}{l} f = 31\ 287\ 036\ 411,7 \text{ kHz} \\ \lambda = 9\ 582,002\ 400\ 45 \text{ nm} \end{array} \right.$$

$$\text{Raie } P_1(50) \text{ de } ^{13}\text{C } ^{16}\text{O}_2 \quad \left\{ \begin{array}{l} f = 26\ 035\ 339\ 977,6 \text{ kHz} \\ \lambda = 11\ 514,827\ 855\ 44 \text{ nm} \end{array} \right.$$

$$\text{Raie } R_1(30) \text{ de } ^{12}\text{C } ^{16}\text{O}_2 \quad \left\{ \begin{array}{l} f = 29\ 442\ 483\ 319,7 \text{ kHz} \\ \lambda = 10\ 182,308\ 833\ 96 \text{ nm} \end{array} \right.$$

L'incertitude relative de ces valeurs est estimée à  $1,5 \times 10^{-10}$  (sauf pour la raie à  $1,15 \mu\text{m}$ ); l'incertitude des fréquences du  $\text{CO}_2$  représente l'erreur de décalage de chaque laser utilisé comme oscillateur de transfert. Ces incertitudes correspondent à  $1 \sigma$  (un écart-type).

JILA : La mesure récente faite avec le NBS de la fréquence de la composante i de  $^{127}\text{I}_2$  à  $633 \text{ nm}$  a donné la valeur  $(473\,612\,214\,789 \pm 70) \text{ kHz}$  pour un laser du NBS avec le point froid à  $18^\circ\text{C}$ , une modulation de  $7 \text{ MHz}$  crête à creux, et une puissance de sortie de  $50 \mu\text{W}$ . La référence était un laser à  $\text{CH}_4$  stabilisé et décalé de  $(2,7 \pm 0,2) \text{ kHz}$  vers le bleu de la composante hyperfine centrale du  $\text{CH}_4$ ; pour ce laser on a utilisé la valeur  $(88\,376\,181\,609 \pm 9) \text{ kHz}$  pour se rattacher au Cs. Il faut noter que l'incertitude principale provient du problème de la reproductibilité à  $633 \text{ nm}$ .

1.2. — *Avez-vous mesuré le rapport de fréquence de radiations lasers ?*

PTB : Voir 1.1.

NRC : SIEMSEN, K. J., The Sequence Bands of the Carbon-13 Isotope  $\text{CO}_2$  Laser, *Optics Comm.*, **34**, 1980, pp. 447-450.

SIEMSEN, K. J., Sequence Bands of the Isotope  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$  Laser, *Optics Letters*, **6**, 1981, pp. 114-116.

PETERSEN, F. R., WELLS, J. S., MAKI, A. G. and SIEMSEN, K. J., Heterodyne Frequency Measurements of  $^{13}\text{CO}_2$  Laser Hot Band Transitions, *Appl. Opt.*, **20**, 1981, pp. 3635-3640.

NBS : a) Mesure de la fréquence de la raie  $^{127}\text{I}_2$  à  $0,576 \mu\text{m}$  (composante o de la raie 17-1, P(62)) par rapport à la fréquence de la raie  $\text{P}_1(50)$  du  $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$  :  $26\,035\,339,973 \text{ MHz} \pm 1 \times 10^{-9}$ . La fréquence de la raie de  $^{127}\text{I}_2$  a été trouvée égale à  $520\,206\,808,307 \text{ MHz} \pm 1 \times 10^{-9}$ ; l'exactitude de cette mesure est limitée par celle de la fréquence de la raie de  $\text{CO}_2$  et l'incertitude pourrait atteindre  $4 \times 10^{-11}$ .

b) Mesure de la fréquence d'un laser à  $^{20}\text{Ne}$  asservi sur le Lamb dip à  $1,15 \mu\text{m}$  par rapport à la raie à  $0,576 \mu\text{m}$  désignée ci-dessus. On a obtenu :  $260\,103\,249,20 \text{ MHz} \pm 1 \times 10^{-9}$ . La reproductibilité de ce laser est  $5 \times 10^{-10}$ . Ces travaux sont décrits dans un article présenté à la CPEM, à Boulder, en juin 1982.

c) On a montré la possibilité de faire des mesures de différences de fréquence de l'ordre du THz dans le visible en utilisant des diodes métal-isolant-métal (à paraître dans *Optics Letters*).

IMGC : Voir 1.1.

NRLM : On a mesuré la différence de fréquence entre un laser asservi sur le méthane et le troisième harmonique de la transition R(30) à  $10,2 \mu\text{m}$  d'un laser à  $\text{CO}_2$ . La différence est  $(48\,731,796 \pm 0,281)$  MHz.

1.3. — *Avez-vous des résultats concernant des comparaisons de radiations de lasers de laboratoires différents ?*

NPL : Une comparaison de lasers à He-Ne asservis sur l'iode 127 a été faite avec le NBS et le résultat publié [LAYER, H. P., ROWLEY, W. R. C. and MARX, B. R., *Optics Letters*, **6**, 1981, pp. 188-190]. La conclusion est que la fréquence du laser du NBS s'écarte de  $\pm 60$  kHz par rapport à la fréquence des lasers du NPL suivant la puissance des lasers du NBS.

Une comparaison similaire a été faite en mai 1980 avec un laser de l'IMM. La conclusion est que, dans les mêmes conditions, la fréquence du laser de l'IMM est environ 122 kHz plus basse que celle des lasers du NPL; cette différence est attribuée à la cuve à iode de l'IMM.

Une comparaison de lasers à argon ionisé asservis sur l'iode à  $\lambda = 515$  nm a été faite en mars 1979 [SPIEWECK, F., CAMY, G. and GILL, P., *Appl. Phys.*, **22**, 1980, pp. 111-112]. Malheureusement les cuves à iode du NPL étaient contaminées.

NBS : Des comparaisons de lasers à He-Ne asservis sur l'iode 127 faites en 1980 avec le BIPM, avec le NPL et avec l'IMM ont révélé un effet de la puissance d'environ  $2,6 \times 10^{-10}$  pour une variation de la puissance de sortie de 50 à 220  $\mu\text{W}$  (*Optics Letters*, **6**, 1981, pp. 188-190).

CSMU : Préparation de comparaisons de lasers à  $\lambda = 633$  nm avec l'ASMW.

IMM : Lors de comparaisons de fréquence de lasers à He-Ne à  $\lambda = 633$  nm entre l'IMM, le NBS et le NPL, on a obtenu une différence systématique d'environ 100 kHz.

BIPM : Participation à cinq comparaisons de lasers à He-Ne à  $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$  asservis sur le méthane, treize comparaisons de lasers à He-Ne à  $\lambda = 633$  nm asservis sur l'iode et une comparaison de lasers à He-Ne à  $\lambda = 612$  nm asservis sur l'iode.

Les résultats des comparaisons à  $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$  sont publiés dans les Procès-Verbaux du CIPM.

Pour les lasers à  $\lambda = 633$  nm, on a observé des variations de

fréquence du laser NBS de  $\sim 70$  kHz lorsque la puissance surfacique est doublée. A puissance surfacique égale, les fréquences des lasers du BIPM et du NBS sont égales à 10 kHz près. La fréquence du laser de l'IMM était inférieure de  $(99 \pm 10)$  kHz à celle du laser du BIPM.

Pour  $\lambda = 612$  nm on a observé entre les lasers du BIPM et de l'IMGC des écarts qui peuvent atteindre 200 kHz et qui varient suivant la composante étudiée.

#### 1.4. — Mesures d'intervalles de fréquence

##### 1.4.1. — Lasers à He-Ne ( $\lambda = 612$ nm et $\lambda = 633$ nm)

CSIRO : Mesure des différences de fréquence entre toutes les composantes de la transition 10-2, P(110) de l'iode 129 à  $\lambda = 612$  nm. Du fait que ce spectre recouvre celui de la transition 9-2, R(47) de l'iode 127, on peut rattacher les fréquences de ces deux transitions l'une à l'autre [CIDDOR, P. E., BROWN, N., *Opt. Comm.*, **34-1**, 1980, pp. 53-56].

PTB : Laser à He-Ne asservi sur  $^{129}\text{I}_2$  à  $\lambda = 612$  nm : les 28 composantes de la transition 10-2, P(110) ont été résolues tandis que, seulement, 16 des 36 composantes de la transition plus faible 14-4, R(113) ont pu être observées. Les différences de fréquence de ces composantes par rapport à la composante o de la transition 9-2, R(47) de  $^{127}\text{I}_2$  ont été publiées [*Opt. Comm.*, **38**, 1981, pp. 119-123]; en ce qui concerne les autres composantes de la transition 9-2, R(47) de  $^{127}\text{I}_2$ , voir *IEEE Trans.*, **IM-29**, 1980, pp. 354-357.

NPL : Des mesures de l'intervalle  $^{129}\text{I}_2$  (k) —  $^{127}\text{I}_2$  (i) ont déjà été diffusées [document CCDM/82-2]. De nouvelles mesures faites avec une cuve à iode 129 reçue du NBS dont le point froid était maintenu à 12 °C ou à 15 °C donnent pour cet intervalle une valeur qui est  $(10 \pm 5)$  kHz plus faible que la valeur indiquée dans le document cité.

NIM : Intervalles des composantes de  $^{127}\text{I}_2$  :

$$\begin{aligned} d - e &= 12,86 \text{ MHz} & h - i &= 21,94 \text{ MHz} \\ e - f &= 13,36 \text{ MHz} & i - j &= 21,56 \text{ MHz} \\ f - g &= 13,20 \text{ MHz} \end{aligned}$$

On a mesuré les intervalles de fréquence entre la composante o de la raie 9-2, R(47) de  $^{127}\text{I}_2$  et les composantes de forte amplitude de  $^{127}\text{I}_2$  et  $^{129}\text{I}_2$  [DSCHAO, K., GLÄSER, M., HELMCKE, J., *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **IM-29**, 1980, pp. 354-357] et [GLÄSER, M., DSCHAO, K., FOTH, H. J., *Opt. Comm.*, **38**, 1981, pp. 119-123].

NBS : Nouvelle mesure en cours de l'intervalle de fréquence entre la composante i de  $^{127}\text{I}_2$  ( $^{20}\text{Ne}$ ) et la composante k de  $^{129}\text{I}_2$  ( $^{20}\text{Ne}$ ).

ASMW : Laser à He-Ne à  $\lambda = 633$  nm : mesure des intervalles de fréquence entre les composantes d, e, f, g, h, i, j de la transition 11-5, R(127) de  $^{127}\text{I}_2$ . Les résultats sont en accord avec ceux publiés par le CCDM en 1973 avec une incertitude relative comprise entre  $10^{-10}$  et  $10^{-11}$ .

IMGC : Laser à He-Ne à  $\lambda = 633$  nm : des mesures récentes confirment les valeurs diffusées dans le document CCDM/79-27.

Laser à He-Ne à  $\lambda = 612$  nm : mesure des intervalles de fréquence entre les composantes h, r, t de la transition 9-2, R(47) de  $^{127}\text{I}_2$  et la composante o de la même transition :

Composante	h	r	t
$\nu - \nu_0$ (MHz)	284,35	— 86,17	— 334,04
incertitude (MHz)	0,06	0,04	0,02

NRLM : Mesure de l'intervalle de fréquence de 20 composantes, dont 6 nouvelles, de la raie R(127) de la bande 11-5 et de 10 composantes de la raie P(33) de la bande 6-3 de la bande électronique B-X de  $^{127}\text{I}_2$  [MORINAGA, A., TANAKA, K., *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 1978, pp. 114-116].

CSMU : Les résultats des mesures des intervalles entre les composantes de l'iode 127 figurent dans le rapport CSMU-BIPM de 1981 (à paraître).

BIPM :  $\lambda = 612$  nm :

Mesure des intervalles de fréquence pour les composantes suivantes :

$^{127}\text{I}_2$ , 9-2, R( 47), composantes b à u

$^{129}\text{I}_2$ , 10-2, P(110), composantes  $a_1$  à  $a_{28}$

$^{129}\text{I}_2$ , 14-4, R(113), composantes  $b_{19}$  à  $b_{36}$  sauf  $b_{31}$  et  $b_{33}$ .

$\lambda = 633$  nm :

1°  $^{127}\text{I}_2$ , 11-5, R(127) : mesure des écarts de fréquence par rapport à la composante i, des composantes a, b, c, d, e, f, g, h, j, k, l, m, n.

2°  $^{129}\text{I}_2$ , 8-4 (P54) et  $^{127}\text{I}^{129}\text{I}$ , 6-3 P(33) : mesure des écarts par rapport à la composante k de  $^{129}\text{I}_2$  de la composante m de  $^{129}\text{I}_2$  et des composantes l, a, y" de  $^{127}\text{I}^{129}\text{I}$ .

3° Intervalle  $^{129}\text{I}_2$ , k —  $^{127}\text{I}_2$ , i. Il existe un désaccord entre les valeurs du BIPM et celles du NBS, du NPL et du CSIRO [document CCDM/82-2]. En fonction de la puis-

sance, la fréquence de la composante k peut varier de  $(-0,7 \pm 0,1)$  kHz/ $\mu$ W et on a observé aussi une variation du coefficient de pression en fonction de la puissance pour cette composante k.

Pour des puissances surfaciques au milieu de la cuve à iode comprises entre 2 et  $2,5 \times 10^4$  W m<sup>-2</sup>, des amplitudes de modulation crête à creux de 6 MHz et une pression d'iode de 9 Pa, on a obtenu :

$$i - k = (95,87 \pm 0,03) \text{ MHz}$$

et, avec les mêmes puissances surfaciques, mais avec une pression de 17,3 Pa pour <sup>127</sup>I<sub>2</sub> ( $t = 15^\circ\text{C}$ ) et 6,1 Pa pour <sup>129</sup>I<sub>2</sub> ( $t = 4^\circ\text{C}$ ), nous avons obtenu :

$$i - k = (95,95 \pm 0,03) \text{ MHz.}$$

#### 1.4.2. — Lasers à argon asservis sur <sup>127</sup>I<sub>2</sub> à $\lambda = 515$ nm

PTB : Mesure des intervalles de fréquence des composantes de la transition forte 43-0, P(13) de <sup>127</sup>I<sub>2</sub> et aussi des composantes de la transition plus faible 58-1, R(98) [contribution à *Europ. Conf. on Atomic Physics*, 1981, pp. 325-326 et *Chem. Phys. Lett.*, **65**, 1979, pp. 347-352].

## 2. Mesures de longueur d'onde

### 2.1. — Comparaisons interférentielles de longueurs d'onde de lasers

PTB : Mesure du rapport des longueurs d'onde à 633 nm et 612 nm de lasers asservis sur <sup>127</sup>I<sub>2</sub> :

$$\lambda_o/\lambda_i = 0,966\ 791\ 605\ 0; \text{ incertitude : } \pm 3 \times 10^{-10}$$

$\lambda_o$  : composante o de la transition 9-2, R(47)

$\lambda_i$  : composante i de la transition 11-5, R(127).

En admettant la valeur recommandée (CCDM 1973)  $\lambda_i = 632,991\ 399$  nm, on obtient  $\lambda_o = 611,970\ 770\ 6$  nm.

Un nouvel interféromètre de type Michelson a été étudié pour obtenir le rapport des longueurs d'onde avec une meilleure précision; un des miroirs de diamètre 60 mm peut être déplacé de 3,8 m.

NPL : Mesure du rapport des longueurs d'onde du laser à He-Ne asservi sur le méthane ( $\lambda = 3,39$   $\mu$ m) et de la composante d du laser à He-Ne asservi sur l'iode ( $\lambda = 633$  nm) dont le point froid de la cuve était à  $18^\circ\text{C}$  et la modulation crête à creux 6 MHz :

$$\lambda_{\text{CH}_4}/\lambda_{i,127I_2,d} = 5,359\ 050\ 040\ 4 \times (1 \pm 1,5 \times 10^{-9}).$$

L'incertitude correspond à l'écart entre les observations faites sous différentes conditions et est environ 10 fois l'écart-type du rapport. La répétabilité des résultats était de l'ordre de  $1 \times 10^{-11}$  durant plusieurs mois, mais des écarts apparaissent entre les résultats obtenus avec des diamètres différents du diaphragme placé entre l'étalon de Fabry-Perot et le miroir focalisant l'image des anneaux sur la petite ouverture du détecteur.

Une mesure du rapport de la longueur d'onde de la composante o ( $\lambda = 612$  nm) et de celle de la composante i ( $\lambda = 633$  nm) a conduit au résultat suivant :

$$f'_o/f_i = 1,034\ 349\ 072\ 555 \pm 1 \times 10^{-10}$$

dont l'incertitude est principalement due à la reproductibilité du laser à cuve interne à  $\lambda = 612$  nm.

Une mesure de la longueur d'onde de la composante  $a_3$  de la radiation à  $\lambda = 515$  nm a donné le résultat suivant avec le point froid de la cuve à iode à  $0^\circ\text{C}$  et la modulation crête à creux du laser à  $\text{Ar}^+$  égale à 6 MHz :

$$f''_{a_3}/f_i = 1,229\ 889\ 317\ 81 \times (1 \pm 2,4 \times 10^{-10}).$$

La composante principale de l'incertitude provient du déphasage à la réflexion sur les miroirs du Fabry-Perot.

**NRC** : Mesure de la longueur d'onde  $\lambda_o$  correspondant à la fréquence doublée de la radiation à  $\lambda = 1,15$   $\mu\text{m}$  par rapport à la radiation à  $\lambda = 633$  nm asservie sur la composante i de la transition 11-5, R(127) de  $^{127}\text{I}_2$ ; la longueur d'onde  $\lambda_o$  est asservie sur la composante o de la transition 17-1, P(62) de  $^{127}\text{I}_2$ ; on a obtenu :  $\lambda_o = (576\ 294\ 758 \pm 6)$  fm. [BAIRD, K. M., EVENSON, K. M., HANES, G. R., JENNINGS, D. A., PETERSEN, F. R., *Opt. Letters*, **4**, 1979, pp. 263-4.]

**NIM** : Mesure du rapport des longueurs d'onde des radiations de lasers à He-Ne à  $\lambda = 633$  nm ( $^{127}\text{I}_2$ ) et  $\lambda = 3,39$   $\mu\text{m}$  ( $\text{CH}_4$ ) :

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{CH}_4}/\lambda_{^{127}\text{I}_2}, \text{ pic i} &= 5,359\ 048\ 177 \\ \lambda_{\text{CH}_4}/\lambda_{^{127}\text{I}_2}, \text{ pic f} &= 5,359\ 049\ 762. \end{aligned}$$

L'incertitude relative est  $2 \times 10^{-9}$ .

**NRLM** : a) Mesure de la longueur d'onde d'un laser à He-Xe asservi sur  $\text{H}_2\text{CO}$  ( $5_{1,5}$  (état fondamental) —  $6_{0,6}$  ( $\nu_5 = 1$ )) par rapport à la longueur d'onde d'un laser asservi sur le méthane au moyen d'un interféromètre Fabry-Perot à balayage de pression. On a obtenu  $\lambda = 3\ 507\ 979,48$  pm avec un écart-type  $s_{n-1}$  de 0,39 pm soit  $1,1 \times 10^{-7}$ .

b) Mesure de la longueur d'onde d'un laser à CO<sub>2</sub> stabilisé à 9,3 μm par une technique de up-conversion. On a obtenu :  $\lambda = 9,317\,246\,31\ \mu\text{m}$  avec une incertitude statistique estimée meilleure que  $1,4 \times 10^{-8}$  correspondant à l'écart-type de la moyenne de 33 mesures. L'incertitude systématique est estimée à environ  $3 \times 10^{-9}$ .

BIPM : a) A l'aide d'un laser à colorant à fréquence réglable asservi sur <sup>127</sup>I<sub>2</sub>, on a mesuré les longueurs d'onde de la composante o de la raie 14-1, P(114) et de la composante n de la raie 15-2, P(38), par rapport à la composante d de <sup>127</sup>I<sub>2</sub>, 11-5, R(127) :

$$\begin{aligned}\lambda_o &= 589\,756\,661,7\ \text{fm};\ s = 0,2\ \text{fm} \\ \lambda_n &= 589\,158\,022,0\ \text{fm};\ s = 0,45\ \text{fm}\end{aligned}$$

(voir : *Metrologia*, 17, 1981, pp. 77-79).

b) Mesure simultanée des rapports des longueurs d'onde de trois radiations :

laser à He-Ne, <sup>127</sup>I<sub>2</sub>, 11-5, R(127) composante d,

laser à He-Ne, <sup>127</sup>I<sub>2</sub>, 9-2, R(47) composante o,

laser à Ar<sup>+</sup>, <sup>127</sup>I<sub>2</sub>, 43-0, P(13) composante a<sub>3</sub> (ou s).

Les rapports sont suivis de l'incertitude relative correspondant à l'écart-type :

$$\begin{aligned}\lambda_d/\lambda_o &= 1,034\,348\,711\,3; 2,1 \times 10^{-10} \\ \lambda_{a_3}/\lambda_d &= 0,813\,081\,579\,7; 2,9 \times 10^{-10} \\ \lambda_o/\lambda_{a_3} &= 1,189\,046\,667\,5; 3,1 \times 10^{-10}.\end{aligned}$$

En prenant comme référence la composante i et l'intervalle entre les composantes i et d recommandés depuis 1973, on obtient :

$$\begin{aligned}\lambda_o &= 611\,970\,771,0\ \text{fm};\ s = 0,12\ \text{fm} \\ \lambda_{a_3} &= 514\,673\,467,2\ \text{fm};\ s = 0,16\ \text{fm}.\end{aligned}$$

JILA : J. J. Snyder (du NBS) a suggéré pour améliorer la résolution de la technique du lambdamètre, une méthode qui utilise des échantillons multiples et la moyenne des signaux; elle peut s'appliquer pour les mesures de fréquence ou de longueur d'onde. Les premiers essais de l'adaptation de cette méthode au lambdamètre du JILA sont très prometteurs.

## 2.2. — Étude des termes correctifs

PTB : Plusieurs méthodes expérimentales ont été employées pour déterminer, dans les interféromètres de Michelson, les défauts des éléments optiques, pour réaliser le réglage précis de ces éléments et pour étudier la courbure du plan d'onde en vue du

calcul de la correction de diffraction dans des mesures interférentielles.

Des réfractomètres à enregistrement automatique sont en cours d'étude.

**NPL** : Calcul de l'effet de diffraction dans les mesures de longueur d'onde dans un Fabry-Perot pour un éclairage en lumière incohérente et pour un éclairage en lumière spatialement cohérente. La distorsion calculée des anneaux de Haidinger est telle que, dans la plupart des cas, il y a une dimension particulière du petit trou explorateur pour laquelle le déplacement des franges dû à la diffraction est minimal. Lors de la mesure du rapport  $(\lambda = 3,39 \mu\text{m})/(\lambda = 0,633 \mu\text{m})$  on a constaté expérimentalement que l'effet de la dimension du trou explorateur correspondait avec précision aux résultats du calcul, mais que l'effet du diaphragme placé dans le faisceau parallèle était plus important que celui prévu par la théorie.

**NRLM** : a) Étude des conditions nécessaires pour réduire les erreurs systématiques à moins de  $1 \times 10^{-10}$  dans une mesure de longueur d'onde d'un laser asservi sur l'iode par rapport à la radiation étalon du  $^{86}\text{Kr}$  au moyen d'un interféromètre Fabry-Perot à balayage de pression. Avec un objectif de longueur focale 510 mm, il faut que la petite ouverture soit centrée sur l'axe optique à mieux que 0,015 mm, qu'elle coïncide avec le point focal à mieux que 0,3 mm, que le parallélisme des miroirs soit réalisé à mieux que  $7 \times 10^{-7}$  rad, que le diamètre des miroirs soit plus grand que 30 mm et que la pression initiale soit inférieure à 9 Pa.

b) Mesure de l'indice de réfraction de l'air humide dans la région de  $\lambda = 3 \mu\text{m}$  avec une précision de  $1,2 \times 10^{-8}$ ; mesure de l'indice de réfraction de la vapeur d'eau. On a vérifié que la formule d'Edlén pour l'air sec peut être extrapolée jusqu'à la région de  $\lambda = 3 \mu\text{m}$ . La formule de dispersion de la lumière visible dans la vapeur d'eau nécessite des corrections pour être appliquée vers  $\lambda = 3 \mu\text{m}$ . [MATSUMOTO, H., *Metrologia*, **18**, 1982, pp. 49-52.]

### 3. Reproductibilité

3.1. — *Lasers asservis sur le méthane*  $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$

**PTB** :  $\pm 2 \times 10^{-11}$  soit  $\pm 2$  kHz.

**NPL** :  $\pm 3 \times 10^{-11}$  [*IEEE Trans. Instr. Meas.*, **IM-29**, N° 4, 1980, pp. 257-264].

Une dispersion de 4 kHz (max-min) a été observée pour un groupe de sept lasers ce qui conduit à un écart-type de 1,5 kHz soit  $1,7 \times 10^{-11}$ .

L'écart-type de la moyenne des six déterminations données dans l'Annexe au document CCDDM/82-4 E est 2,6 kHz; l'incertitude composée est 3 kHz et l'incertitude correspondant à 3 s est  $\pm 9$  kHz soit  $\pm 1 \times 10^{-10}$ .

**NRLM** : Un déplacement de 10 à 20 kHz dû à l'amplitude de modulation a été observé; on estime à 2 kHz/mV le déplacement dû aux tensions parasites et un ajustement fin du système d'asservissement peut réduire ce déplacement à 3 kHz [OH1, M., AKIMOTO, Y., *Jap. J. Appl. Phys.*, **18**, 1979, pp. 1425-1428].

**IMM** : On peut admettre  $\pm 2 \times 10^{-10}$ .

**BIPM** : Les résultats de cinq comparaisons internationales montrent que la reproductibilité est meilleure que 5 kHz soit environ  $6 \times 10^{-11}$ .

**JILA** : Des résultats récents confirment qu'une reproductibilité meilleure que  $\pm 5$  kHz (soit  $\pm 6 \times 10^{-11}$ ) est pratiquement assurée pourvu que le laser soit étudié pour éviter des erreurs telles que contamination de la cuve, non-linéarité du balayage PZT, excessive courbure du front d'onde ou aberrations dans la cuve à CH<sub>4</sub>, trop grande puissance, décalage de fréquence dû à l'électronique, effet du second harmonique.

3.2. et 3.3. — *Lasers asservis sur l'iode  $\lambda = 515$  nm, 612 nm, 633 nm et autres lasers*

**CSIRO** : Pour  $\lambda = 633$  nm, voir [CCDDM/78-3] et [*Metrologia*, **16**, 1980, pp. 63-68].

**PTB** : Pour les lasers He-Ne à  $\lambda = 612$  et 633 nm asservis sur  $^{127}\text{I}_2$  ou  $^{129}\text{I}_2$  avec une amplitude de modulation de 6 MHz crête à creux et une pression de 17,3 Pa, la reproductibilité relative est estimée meilleure que  $\pm 10^{-10}$  soit  $\pm 50$  kHz.

Pour le laser à  $\text{Ar}^+$  à  $\lambda = 515$  nm,  $^{127}\text{I}_2$ , préstabilisé, faisceau étendu, cuve externe, amplitude de modulation inférieure à 1 MHz crête à creux et pression inférieure à 3 Pa, la reproductibilité relative est estimée à  $\pm 1 \times 10^{-11}$  soit  $\pm 6$  kHz.

**NPL** : Pour deux lasers identiques à  $\lambda = 633$  nm et  $^{127}\text{I}_2$ , on obtient couramment  $\pm 5$  kHz. Une étude de l'effet de puissance a été faite [ROWLEY, W. R. C., *NPL Report*, **MOM56**, Dec. 1981] ainsi que de l'effet de la température des parois de la cuve et

de celle du point froid et de l'effet de l'amplitude de modulation qui peut se résumer ainsi :

pour  $293 \text{ K} \leq T \leq 473 \text{ K}$  (température des parois entre 20 et 200 °C),

pour  $14,2 \text{ Pa} \leq p \leq 26,7 \text{ Pa}$  (point froid entre 13 et 20 °C),  
pour  $4 \text{ MHz} \leq M \leq 7 \text{ MHz}$  ( $M$  est l'amplitude crête à creux de la modulation),

la fréquence du laser est comprise dans un intervalle limité à  $\pm 100 \text{ kHz}$  de part et d'autre de la fréquence pour  $T = 293 \text{ K}$ ,  $p = 18,7 \text{ Pa}$  et  $M = 6 \text{ MHz}$  crête à creux. Une reproductibilité de  $\pm 20 \text{ kHz}$  pourrait être obtenue en spécifiant les paramètres plus strictement.

Pour le laser à  $\lambda = 612 \text{ nm}$  asservi sur  $^{127}\text{I}_2$  on pourrait indiquer une reproductibilité de  $\pm 200 \text{ kHz}$ .

Pour le laser à  $\text{Ar}^+$  :  $\pm 200 \text{ kHz}$ .

Pour le laser à  $515 \text{ nm}$  et le laser à  $\text{Kr}^+$ , on a observé des stabilités approchant celle du laser à  $633 \text{ nm}$ .

**NBS** : Pour  $\lambda = 633 \text{ nm}$  avec cuve externe :  $1 \times 10^{-11}$ ; avec cuve interne la reproductibilité pourrait atteindre  $2 \times 10^{-10}$  avec contrôle de la puissance.

Pour les lasers asservis à  $\lambda = 576 \text{ nm}$  :  $1 \times 10^{-9}$  mais une nouvelle détermination de  $\text{P}_1(50) \text{ }^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$  conduirait à l'amélioration de l'exactitude de la raie  $\lambda = 576 \text{ nm}$  de  $^{127}\text{I}_2$  qui approcherait  $4 \times 10^{-11}$ .

**ASMW** : Laser asservi sur  $^{127}\text{I}_2$  à  $\lambda = 633 \text{ nm}$  :  $5 \times 10^{-11}$ .

**IMGC** : Laser à  $\lambda = 633 \text{ nm}$  : si l'on recommande des conditions de fonctionnement et de construction, on peut atteindre une reproductibilité de  $\pm 4 \times 10^{-11}$ .

Laser à  $\lambda = 612 \text{ nm}$  :  $\pm 1 \times 10^{-10}$  avec cuve interne.

**NRLM** : Pour un laser He-Ne à  $\lambda = 633 \text{ nm}$ , on a mesuré les effets de pression et de puissance pour trois composantes hyperfines : h, i, j de  $^{127}\text{I}_2$ . On a obtenu respectivement : 437, 448 et 447 kHz/Pa et pour les trois composantes : 34,3 kHz/ $\mu\text{W}$  de 8 à 32  $\mu\text{W}$ .

On estime que la reproductibilité de fréquence de ces lasers est  $\pm 6 \times 10^{-11}$ .

**CSMU** : Laser à  $\lambda = 633 \text{ nm}$  : reproductibilité de 20 kHz.

**IMM** : Pour des lasers à He-Ne asservis sur  $^{127}\text{I}_2$  à  $\lambda = 612 \text{ nm}$  et 633 nm, on peut admettre  $\pm 2 \times 10^{-9}$ .

**BIPM** : a)  $\lambda = 612 \text{ nm}$ . La répétabilité est de l'ordre de  $3 \times 10^{-11}$  en valeur relative pour une pression de l'iode de 1,2 Pa et une

amplitude de modulation crête à creux de 7 MHz; la reproductibilité est de l'ordre de  $8 \times 10^{-11}$  pour les composantes non perturbées (h, o, t) mais elle peut aller jusqu'à  $8 \times 10^{-10}$  dans le cas de la composante s. La qualité de la cuve à iode semble être encore plus importante que dans le cas des lasers à  $\lambda = 633$  nm.

- b)  $\lambda = 633$  nm. Pour des comparaisons de lasers, il est important de spécifier la puissance surfacique au milieu de la cuve à iode.

On a observé qu'en dessous de 5 Pa les variations de fréquence produites par l'amplitude de modulation et par la pression de l'iode s'accroissaient d'une façon non linéaire : par exemple à une pression de 0,8 Pa et avec une amplitude de modulation de 10 MHz, on a observé un décalage de fréquence de + 79 kHz (soit  $1,7 \times 10^{-10}$ ) par rapport à une extrapolation linéaire.

JILA : Sans spécifications pour la construction et l'utilisation du laser à He-Ne  $^{127}\text{I}_2$  à  $\lambda = 633$  nm, on peut observer des décalages de fréquence de 250 kHz soit  $5 \times 10^{-10}$ . Les effets dus à la pression, à la modulation, à l'intensité sont tous du même signe (vers le rouge). En adaptant les divers paramètres opératoires et sans décalage dû à l'électronique, la reproductibilité est améliorée d'un facteur 50 au moins.

#### 4. Étalons matériels

CSIRO : a) Amélioration de l'interféromètre pour mesurer des règles de 1 mètre.

- b) Construction d'un interféromètre de 1 m pour les étalonnages de règles divisées.

c) Mise en œuvre d'une base de 60 m pour la mesure de rubans géodésiques par comptage de franges d'un laser; la résolution de l'interféromètre est 100 nm, mais les incertitudes sur la température du ruban, sur la longueur d'onde du laser et sur l'indice de réfraction de l'air limitent l'incertitude des mesures à  $5 \times 10^{-7}$ .

d) Les interféromètres pour la mesure des étalons à bouts jusqu'à 0,5 m ont été équipés d'installations d'acquisition et de réduction de données.

e) Ce laboratoire a participé à la comparaison internationale de mesures d'angle.

PTB : Un dilatomètre pour calibres jusqu'à 100 mm de longueur est maintenant utilisé.

Un appareillage pour analyser l'image des franges sur les calibres est en cours d'étude.

**NIM** : a) Mesures d'angles : mise en œuvre d'un appareil de haute précision atteignant  $\pm 0,2''$ .

Construction d'un interféromètre à laser pour mesure de petits angles; son exactitude atteint  $\pm 0,05''$  pour un domaine de  $\pm 1^\circ$ .

b) Mesures de longueur.

Un interféromètre à laser est utilisé couramment pour la mesure automatique des étalonnages de règles divisées; l'incertitude est  $\pm 0,07 \mu\text{m}$ .

Les calibres de 0,5 mm à 1 000 mm sont mesurés automatiquement dans un interféromètre à laser. Le signal donné par la frange blanche commande le comptage de franges. L'incertitude est, en  $\mu\text{m}$ ,  $\pm (0,01 + 0,07 l)$ , où  $l$  est la longueur en mètre du calibre.

**NBS** : L'interféromètre commandé par ordinateur pour mesure des règles divisées a été reconstruit et sera équipé d'un laser asservi sur l'iode.

**ASMW** : a) Les calibres jusqu'à 2 m sont mesurés par une méthode automatique de comptage de franges avec un écart-type  $s = 0,03 \mu\text{m}$  et une incertitude de mesure pour  $P = 0,99$  de  $u = 0,03 \mu\text{m} + 1 \times 10^{-7} l$  où  $l$  est la longueur en mètres du calibre.

b) L'étalon pour l'unité d'angle se compose d'un dispositif de mesure normal pour petits angles à règle tangente et d'un dispositif de mesure normal : cercle de giration complet. Pour le premier dispositif l'écart-type est  $s = 0,02''$  et l'incertitude de mesure pour  $P = 0,99$  est  $u = 0,1''$  pour  $15'$ ; pour le second dispositif, de  $15'$  à  $360^\circ$ , l'écart-type est  $s = 0,01''$  et l'incertitude de mesure pour  $P = 0,99$  est  $u = 0,02''$ .

**NRLM** : a) On a mesuré un calibre de 800 mm dans un interféromètre en utilisant un laser à He-Xe émettant simultanément à  $\lambda = 3,51$  et  $3,37 \mu\text{m}$ ; le rapport des fréquences est déterminé avec une précision de  $1,7 \times 10^{-8}$  et la longueur du calibre est mesurée avec une précision de  $4,9 \times 10^{-8}$ . L'interféromètre permet de mesurer des étalons de longueur de plusieurs mètres.

b) Douze laboratoires participent à la comparaison internationale de mesure d'angle qui a débuté en décembre 1980. Actuellement, quatre laboratoires ont fait les mesures : NRLM, CSIRO, NBS, NPL. Deux rapports ont été reçus : ceux du CSIRO et du NRLM.

- IMM** : L'étalon primaire d'angle est composé :
- d'un vérificateur interférentiel pour la reproduction de l'unité et la transmission au domaine des petits angles;
  - d'un autocollimateur photoélectrique adapté aux polygones optiques;
  - d'un dodécagone optique en quartz pour le contrôle de la stabilité de l'étalon.

Cet étalon assure la reproduction de l'unité avec un écart-type du résultat  $s = 0,01''$  pour 132 mesures du dodécagone.

L'incertitude systématique résiduelle ne dépasse pas  $0,02''$ .

- BIPM** : Commande d'une règle décimétrique munie de quatre divisions demi-centimétriques imbriquées avec des traits de largeurs 5, 7, 9 et  $11 \mu\text{m}$ . Une étude complète de la règle a été faite. On a observé les effets suivants :

- le changement d'intensité de courant dans les lampes des microscopes n'a pas d'influence sensible;
- la dispersion des résultats de huit étalonnages (soit deux pour chaque position de la règle et pour chaque microscope) augmente de 7 nm pour les traits les plus fins à 59 nm pour les traits les plus larges (écarts-types moyens); on entend, ici, par étalonnage la détermination des écarts des traits par rapport à une échelle linéaire s'appuyant sur les deux traits extrêmes de la même division;
- le retournement de la règle entraîne principalement un déplacement apparent des échelles par rapport à l'échelle aux traits les plus fins prise comme référence; ce « déplacement » atteint  $0,4 \mu\text{m}$  pour l'échelle aux traits les plus larges;
- le changement de microscope entraîne aussi un déplacement apparent qui atteint  $0,8 \mu\text{m}$  pour l'échelle aux traits les plus larges.

Les « déplacements » observés croissent avec la largeur des traits et sont beaucoup plus importants que le défaut de reproductibilité des pointés. On a ainsi confirmé que la qualité métrologique d'une règle tient plus à la similitude de ses traits qu'à leur finesse.

- JILA** : Pour asservir un laser à colorant, on a construit un étalon de référence en silice fondue dont la finesse optique est de 1 000 et la stabilité correspond à  $\pm 100 \text{ kHz}$  (soit  $\pm 2 \times 10^{-10}$ ) pendant plusieurs jours.
-

ANNEXE M 3

---

**Rapport du Groupe de travail ad hoc CCDM/CCU  
au Comité International des Poids et Mesures**

(28-29 avril 1981)

par W. R. C. ROWLEY, Rapporteur

---

Au cours des dernières années les problèmes liés à une nouvelle définition du mètre ont fait l'objet de discussions à plusieurs reprises au CCDM et au CCU. Les perspectives envisagées en ces occasions étaient différentes selon le but précis considéré. Ceci a conduit à diverses propositions de formulation d'une nouvelle définition. En vue d'une discussion complète du problème, le CIPM, lors de sa session d'octobre 1980, a proposé qu'un Groupe de travail *ad hoc*, réunissant à la fois des membres du CCDM et du CCU discute la question avant qu'une proposition définitive soit présentée au CIPM.

Le Groupe de travail pour la formulation d'une nouvelle définition du mètre s'est réuni au Pavillon de Breteuil, à Sèvres, le mardi 28 et le mercredi 29 avril 1981.

Étaient présents :

MM. J. de BOER, Président du CCU, Président du Groupe de travail,  
D. KIND, Président du CCDM,  
H. H. JENSEN, Secrétaire adjoint du CIPM,  
B. GUINOT, Président du CCDS.

Les Délégués des laboratoires suivants :

Institut National de Métrologie [NIM], Beijing (H. WU).  
Conseil National de Recherches [NRC], Ottawa (K. M. BAIRD).  
National Bureau of Standards [NBS], Washington et Boulder  
(D. T. GOLDMAN, K. G. KESSLER).  
National Physical Laboratory [NPL], Teddington (O. C. JONES,  
W. R. C. ROWLEY).  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig  
(F. BAYER-HELMS, S. GERMAN).

Le Directeur du BIPM (P. GIACOMO).

Assistaient aussi à la session :

J. TERRIEN, directeur honoraire du BIPM, T. J. QUINN, sous-directeur du BIPM, P. CARRÉ, J.-M. CHARTIER, J. HAMON, R. P. HUDSON (BIPM).

Excusés :

National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Tokyo (K. TANAKA) et Institut de Métrologie D. I. Mendéléev [IMM], Leningrad.

En ouvrant la session le Président accueille les participants et indique l'organisme que chacun représente. Il résume brièvement les raisons qui ont amené la convocation de ce Groupe commun; il exprime l'espoir que les discussions permettront de rapprocher les opinions divergentes qui semblent exister au CCU et au CCDM sur la formulation convenable d'une nouvelle définition du mètre, fondée sur une valeur fixe de la vitesse de la lumière.

Mr Rowley (assisté de Mr Hamon et de Mr Hudson) est nommé rapporteur; l'ordre du jour est approuvé.

### **Points de vue sur la proposition d'une nouvelle définition du mètre**

Le Président indique qu'il incombe au Groupe de travail d'étudier les différentes formulations et non de prendre des décisions sur l'opportunité d'une nouvelle définition du mètre. Il pense toutefois qu'il serait utile au CIPM de connaître l'opinion des représentants du CCDM qui participent à ce Groupe de travail sur deux questions : est-il certain que l'on doit faire une proposition ferme de fonder la définition du mètre sur une valeur fixe de la vitesse de la lumière et à quelle date une telle décision peut-elle être prise ?

Mr Baird est d'avis que d'ici un an il y aura suffisamment de résultats expérimentaux pour que l'on puisse faire une recommandation. Cela donne le temps de préparer un projet à soumettre à la CGPM en 1983. Des travaux sur les mesures absolues de fréquence sont en cours au NBS, au NRC et au NPL; on aura vraisemblablement au début de l'année 1982 des résultats dans le domaine du visible avec des incertitudes relatives de  $1 \times 10^{-10}$  ou mieux. On peut même envisager des incertitudes de  $1 \times 10^{-13}$ , avec des asservissements en phase; toutefois on n'atteindra probablement pas cette exactitude d'ici un an.

Mr Kessler pense également qu'on sera effectivement en mesure de faire une recommandation dans un an. Comme les mesures de fréquence constitueraient une réalisation primaire du mètre selon la nouvelle définition (au moyen de la relation  $\lambda = c/f$ ), il ne faut pas que le CCDM se réunisse trop tôt, afin que les recommandations de mise en pratique

puissent bénéficier des résultats de nouvelles mesures aussi nombreuses que possible.

Mr Bayer-Helms considère qu'avant que le CCDM soit en mesure de faire une recommandation, il serait nécessaire d'avoir plusieurs mesures indépendantes de fréquences de lasers dans le visible, avec une incertitude nettement inférieure aux  $4 \times 10^{-9}$  que l'on obtient avec la définition fondée sur le  $^{86}\text{Kr}$ . A son avis, par exemple, on pourrait se fixer comme objectif suffisant et réalisable des mesures directes de fréquence avec une incertitude inférieure à  $1 \times 10^{-10}$ .

Toutefois, Mr Rowley pense que le niveau actuel d'exactitude, obtenu en utilisant des mesures de fréquence dans l'infrarouge proche et le passage de l'infrarouge au visible par interférométrie, constitue déjà une nette amélioration. Il a été rendu compte de deux mesures dont l'incertitude est inférieure à  $1 \times 10^{-9}$  (mais qui diffèrent entre elles de  $1 \times 10^{-9}$ ) sur le laser à He-Ne dans le rouge : une mesure faite au NBS au moyen d'un laser asservi sur le méthane à  $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ , avec une incertitude de  $6 \times 10^{-10}$ , et une mesure faite au NPL au moyen d'un laser à  $\text{CO}_2$ , avec une incertitude de  $6 \times 10^{-10}$ . Il n'est pas nécessaire de considérer l'objectif indiqué de  $1 \times 10^{-10}$  comme une obligation stricte : un tel objectif se situerait à la limite de ce que l'on peut obtenir avec les techniques actuelles de mesure des longueurs d'onde en interférométrie et il est très supérieur à ce dont on a besoin en métrologie des longueurs. On doit procéder dès que possible au changement de définition du mètre, afin de réduire l'incertitude sur les valeurs des longueurs d'onde des lasers asservis que l'on recommande comme étalons en métrologie des longueurs et pour la mesure des constantes physiques.

Le Président remercie les représentants du CCDM pour leurs avis sur ces questions. Il semble que le CCDM sera en mesure de recommander une nouvelle définition l'an prochain, bien que le Groupe de travail ne puisse en préjuger et qu'un ajournement soit toujours possible. En accord avec Mr Giacomo, il est convenu que les meilleures dates à retenir pour la prochaine session du CCDM seraient les 3 et 4 juin 1982. Le CCU pourrait alors se réunir la semaine suivante (8, 9 et 10 juin 1982), afin d'être en mesure d'avoir une discussion finale sur la formulation du projet de nouvelle définition.

### **Les diverses formulations d'une nouvelle définition du mètre**

Quatre propositions de définition ont été présentées. Malgré leurs différences apparentes, les quatre propositions reviennent à fonder le mètre sur la valeur fixe de 299 792 458 m/s pour la vitesse de la lumière. Afin de faciliter la discussion, le Président suggère de numéroter les propositions comme suit :

- 1) Le mètre est la longueur égale à  $9\,192\,631\,770/299\,792\,458$  longueurs

d'onde dans le vide de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

2) Le mètre est la longueur égale à  $f/299\,792\,458$  longueurs d'onde dans le vide d'une onde électromagnétique plane infinie de fréquence  $f$  hertz.

3) Le mètre est la longueur égale à la longueur d'onde dans le vide d'une onde électromagnétique plane infinie de fréquence  $299\,792\,458$  hertz.

4) Le mètre est la longueur égale au trajet parcouru dans le vide par des ondes électromagnétiques planes infinies pendant une durée de  $1/299\,792\,458$  seconde.

### Présentation des documents

Un certain nombre de documents ont été soumis au Groupe de travail soit par des délégués présents, soit par d'autres personnes, chacun ayant exposé sa préférence et les raisons de celle-ci.

Le CCU a étudié ce problème d'une nouvelle définition lors de sa réunion en mai 1980, et un extrait de son rapport est présenté. La préférence du CCU va aux formulations (1) ou (2). Ces deux formulations spécifient une longueur d'onde, comme le fait la définition actuelle à partir du  $^{86}\text{Kr}$ ; elles n'introduiraient donc dans le Système International d'Unités qu'une modification légère. De plus, la définition (1) apporterait une simplification du fait qu'un seul et même étalon (la transition du césium) servirait à définir à la fois le mètre et la seconde. Par ailleurs, au contraire des autres formulations, cette définition ne présuppose pas l'existence d'une définition préalable de l'unité de temps (ou de fréquence), de telle sorte qu'elle n'entraîne aucune modification de l'ordre des unités de base. Les principaux inconvénients qu'on y voit sont la présence d'un facteur numérique malcommode et la mention explicite de l'étalon à césium : tout changement de définition de la seconde entraînerait l'obligation de changer la définition du mètre.

Lors de la 6<sup>e</sup> session du CCDM, en juin 1979, la formulation d'une nouvelle définition n'a été étudiée que brièvement; l'essentiel de la discussion à l'époque avait porté sur l'opportunité d'utiliser la vitesse de la lumière comme base d'une nouvelle définition. Néanmoins, le CCDM a proposé la définition (4) (Recommandation M2 (1979)). L'argument auquel on avait attaché le plus grand poids était la facilité de compréhension par les non-spécialistes, tenant compte du fait que la définition devra figurer dans les manuels et dans les publications sur le SI destinés à l'usage général.

Dans une lettre au Président du CCDM, le NBS avait exprimé sa préférence pour la formulation (2) car elle correspond à la pratique métrologique au plus haut niveau d'exactitude : aucune fréquence particulière n'y est mentionnée, de telle sorte que chaque laboratoire peut

choisir celle qui lui convient le mieux selon l'utilisation. Le NBS a depuis lors publié une lettre dans *Journal of the Optical Society of America* sollicitant des commentaires sur les différentes définitions proposées. Les réponses n'ont pas été très nombreuses mais à leur suite et à la suite d'autres discussions, le NBS pense maintenant que la formulation (4) est préférable. En fait Hall, Ramsey et Purcell, dont les noms étaient liés à la formulation (2), sont maintenant favorables à la définition (4). La préférence pour (4) est due à son évidente simplicité et à son application directe aux mesures sur de longues distances, utilisation qui suppose toutefois un repère inertiel unique et un potentiel gravitationnel constant.

Dans une lettre, Mr Frenkel a indiqué sa préférence pour (4) parce que la formulation est simple et compréhensible par la majorité des gens; à son avis, mise à part la métrologie, c'est surtout pour rendre compte d'expériences d'astrophysique utilisant des durées de parcours optiques que l'on a le plus besoin de définir des longueurs avec une grande précision.

Dans une lettre de Mr Blevin, le CSIRO appuie la proposition (4). Le CSIRO pense que la simplicité d'expression est plus importante que le rapport étroit avec la réalisation pratique. Ce laboratoire a également sollicité des commentaires sur les formulations proposées, en expliquant sa préférence pour (4) et en soulignant que dans une définition les concepts de base passent avant la mise en pratique.

Mr Terrien est nettement en faveur de la formulation (4). Elle satisfait à deux critères importants : être simple et compréhensible pour celui qui n'est pas physicien et être sans ambiguïté pour le physicien. Du point de vue de la physique, les autres formulations seraient équivalentes, mais elles font appel à des concepts inutiles et complexes pour le non-physicien. Mr Terrien n'est plus en faveur de (3), bien qu'il l'ait proposée il y a quelques années.

Le NPL préfère la formulation (2). La raison principale en est qu'elle suggère une réalisation conforme à la pratique actuelle en laboratoire. Mr Rowley présente un document dans lequel cette préférence se déduit d'une analyse pondérée des performances de chaque définition par rapport aux qualités que l'on peut souhaiter. Le second choix irait à (4).

Dans une lettre de Mr Cook, l'UAI exprime une franche préférence pour (4) parce que cette formulation est claire, sans ambiguïté et inattaquable du point de vue de la physique.

Le NRLM est en faveur de la formulation (3). Faire référence à une longueur d'onde paraît préférable car il est alors plus facile de réaliser l'étalon. La préférence va à (3) parce que celle-ci ne dépend d'aucun matériau en particulier et elle présente l'avantage d'une expression simple, sans ambiguïté pour le non-spécialiste.

Dans un article publié par Mr Bouchareine dans le *Bulletin du BNM*, le BNM a indiqué sa préférence pour (4), comme étant la plus simple et la plus facile à comprendre par les non-spécialistes. Elle laisserait la possibilité de faire des recommandations sur les meilleurs moyens de la réaliser et aurait aussi de bonnes chances de rester longtemps valable.

Le document soumis par la PTB discute les aspects généraux de la mesure des longueurs dans différents domaines d'application et leur relation avec la vitesse de la lumière. Il souligne que la réalisation à partir d'une définition du mètre indépendante, fondée sur une transition moléculaire choisie, serait plus exacte que la réalisation à partir d'une définition fondée sur une valeur fixe de la *vitesse de la lumière*. Des quatre formulations retenues, on considère que seules (2) et (4) sont utilisables dans la pratique et qu'elles sont toutes les deux bien compréhensibles. La préférence va à (2) car celle-ci est étroitement liée à la réalisation de l'unité de longueur, sans aucune restriction quant à la radiation utilisée et elle est fondée sur une longueur d'onde, comme l'est la définition actuelle.

Dans une courte lettre, le NIM exprime sa préférence pour (2) car on y donne la méthode de réalisation qui convient aux mesures de laboratoire. En second lieu la préférence irait à la formulation (4).

Le NRC est nettement en faveur de la formulation (4) car elle est claire et fait appel à des concepts simples; elle est précise et inattaquable du point de vue scientifique. Les considérations relatives à la réalisation ne devraient pas être mises en balance avec l'élégance de la définition elle-même.

## Discussion des documents

Au cours de la discussion générale des documents présentés, divers autres arguments et considérations sont exposés. On s'accorde pour reconnaître que les quatre propositions vont dans le même sens : définir le mètre de telle sorte que la valeur de la vitesse de la lumière soit fixée à 299 792 458 m/s; les différences portent essentiellement sur la forme. Le choix de la formulation ne doit pas servir de prétexte pour retarder la décision de modifier la définition du mètre.

En ce qui concerne la relativité, la plupart des délégués sont d'avis qu'il n'y a pas de problème sérieux. Le NBS a suggéré (doc. GT-MU/N° 7) qu'une note soit ajoutée à la définition (4) pour indiquer qu'on se réfère à un repère inertiel unique. Mr de Boer est de cet avis. Mr Goldman est d'accord que les formulations (2) et (4) sont équivalentes du point de vue de la relativité, ainsi que Mr Baird (doc. GT-MU/N° 10) qui fait remarquer que les observations astronomiques de temps de vol nécessiteraient des corrections relativistes même avec la formulation (4).

Mr de Boer fait remarquer que les formulations (2) et (4) ne spécifient aucune radiation en particulier de sorte que la dispersion pourrait un jour poser un problème. D'autre part, dans la formulation (2), la valeur numérique de la fréquence  $f$  reste arbitraire; cela n'est pas souhaitable dans une définition et il serait particulièrement difficile de l'expliquer aux non-physiciens.

Au sujet de la simplicité relative des propositions, Mr Guinot insiste sur le point soutenu précédemment par Mr Terrien que la définition devrait être compréhensible par tous et non par quelques spécialistes seulement.

Mr Baird est de cet avis, mais préfère insister sur la généralité et l'élégance scientifique de la formulation (4) qui est non seulement facile à comprendre, mais aussi mathématiquement simple; de plus, avec une telle définition, il est peu probable que, dans l'avenir, le besoin d'une autre définition se fasse sentir. Les délégués du CCU, cependant, n'attachent pas à cette perspective de permanence une très grande importance.

Quant à la préférence du CCU pour une définition fondée sur une longueur d'onde, donc semblable à la définition actuelle, Mr Terrien fait remarquer qu'habituellement une définition nouvelle implique un changement complet de concept; cela est sans inconvénient pour le SI, car le nom et la grandeur de l'unité restent inchangés. Il donne comme exemples le passage de la rotation de la Terre à la fréquence du césium pour la définition de la seconde et de la longueur d'une règle à une longueur d'onde du krypton pour la définition du mètre. (Mr Bouchareine a exprimé un argument analogue dans le doc. GT-MU/N° 5). Pour Mr Baird, la longueur d'onde n'est, en aucun cas, un concept fondamental important; il serait préférable pour les spectroscopistes d'utiliser la fréquence d'une transition spectrale plutôt que sa longueur d'onde. Aussi préfère-t-il la formulation (4) dans laquelle il n'est pas fait mention d'une longueur d'onde. Mr Rowley est d'accord que la fréquence est la grandeur la plus fondamentale en physique, par exemple dans la relation  $E = h\nu$ , par conséquent, il préfère une définition qui mentionne une fréquence et en particulier la formulation (2). Mr Bayer-Helms reconnaît que, naturellement, la fréquence est la grandeur spectrale essentielle en spectroscopie, mais il constate aussi qu'aucune longueur ne pourrait être mesurée sans avoir recours à autre chose qu'à une fréquence seulement. Pour déterminer une longueur à partir d'une fréquence, il est nécessaire d'introduire le concept de longueur d'onde et cela, de nouveau, amène à préférer la formulation (2).

Mr Rowley considère qu'une définition devrait, de préférence, suggérer les moyens primaires de sa mise en pratique. Il y a des précédents dans les définitions actuelles du mètre, de la seconde, de l'ampère et de la candela. Il considère en outre que ce qui est important c'est la mise en pratique d'une unité; c'est la raison de sa préférence pour la formulation (2). Mr Baird ne pense pas que la longueur de 1 m ait une signification particulière dans ce contexte; il considère que la détermination des longues distances est également importante. Mr Guinot estime que les longues distances pourront bientôt être déterminées par des méthodes de mesure de temps de vol avec une exactitude meilleure que celle qu'on peut atteindre sur de courtes distances par interférométrie; il y a un urgent besoin de transformer de telles mesures de temps de vol en mesures de longueur. La question est posée de savoir si les mesures interférométriques qui impliquent une comparaison de phase sont plus exactes que les mesures de temps de vol qui impliquent la détection de photons; les opinions sur ce point sont divergentes. On discute aussi pour savoir si les mesures de longues distances nécessitent une grande exactitude absolue ou, seulement, une bonne

reproductibilité et une exactitude absolue plus modeste. Mr Kind fait ressortir que du point de vue de la suggestion d'une mise en pratique, les formulations (1) et (3) ne sont pas particulièrement heureuses. Ces formulations se réfèrent à des radiations particulières qui ne sont absolument pas utilisables pour des applications pratiques et ne seront probablement jamais utilisées pour les mesures précises de longueur. Mr Terrien et Mr Baird suggèrent qu'une technique de mesure de longueur autre que l'interférométrie ou la mesure du temps de vol pourrait se développer un jour. Ce serait une erreur de fonder la définition seulement sur un moyen de réalisation qui paraît approprié aujourd'hui.

### Suggestions concernant la formulation de la définition

Durant les discussions plusieurs modifications sont suggérées pour améliorer la formulation des définitions proposées. Comme de telles modifications nécessitent un examen très attentif, il n'est pas demandé aux délégués d'exprimer une opinion définitive au cours de cette session. Il s'agit des modifications suivantes.

(a) Employer le mot « lumière » à la place d'onde(s) électromagnétique(s) dans les formulations (2) et (4). En réduisant ainsi le domaine des fréquences, le problème de la dispersion (pour autant qu'il existe) est minimisé; il pourrait être éliminé plus tard par addition d'une note à la définition spécifiant la signification de « lumière ». Mr Rowley croit que, en théorie tout au moins, il pourrait y avoir une dispersion due, aux très basses fréquences, à la masse au repos du photon et, aux hautes fréquences, à la quantification de l'espace. Il est donc nécessaire d'éliminer ces deux extrêmes de la définition du mètre.

(b) Employer, dans le texte anglais, « in free space » à la place de « in vacuum » car « free space » englobe l'idée d'absence de champ.

(c) Mr Rowley préfère qualifier les ondes planes dans les formulations (2) et (4) à l'aide de l'adjectif « continues » au lieu de « infinies ». Il considère que « infinies » est un peu ambigu et pourrait être interprété comme infinies en amplitude aussi bien qu'en dimensions latérales et longitudinales.

Avec les modifications ci-dessus (a), (b), (c), les formulations (2) et (4) deviendraient :

(2a) « Le mètre est la longueur égale à  $f/299\,792\,458$  longueurs d'onde dans le vide (in free space) de la lumière se propageant en ondes planes continues dont la fréquence, exprimée en hertz, a la valeur numérique  $f$  ».

(4a) « Le mètre est la longueur égale à la distance parcourue par la lumière se propageant en ondes planes continues dans le vide (in free space) dans un intervalle de temps de  $1/299\,792\,458$  de seconde ».

(d) Deux formulations possibles pour la définition (2) sont suggérées

dans les documents CCU/81-5 (= CCDM/81-1) et GT-MU/N° 5 (= CCDM/81-8). Aucune n'évite le problème de la fréquence arbitraire.

(e) Mr Bayer-Helms propose une cinquième formulation pour la définition :

(5) « Le mètre est la longueur telle que la vitesse de la lumière soit 299 792 458 mètres par seconde ».

Les avantages de cette formulation sont qu'elle spécifie directement le fait qui est important, à savoir la valeur numérique fixée pour la vitesse de la lumière, et qu'elle ne fait aucune suggestion immédiate concernant une mise en pratique particulière. Cette formulation pourrait être complétée par les formulations (2) et (4) comme exemple des moyens de mise en pratique. Cependant, c'est plus une description de la manière dont le mètre serait défini qu'une définition proprement dite. On considère, en outre, qu'il ne serait pas raisonnable de fonder le mètre sur une vitesse car cela reviendrait à faire de la vitesse la grandeur de base et de la longueur une grandeur dérivée. On pense que le CCU ne trouverait pas cela acceptable.

(f) Le Président suggère que, si l'on ajoutait à la formulation (1) la note suivante, cette formulation pourrait satisfaire les partisans de la formulation (2) : « En pratique, n'importe quelle transition radiative peut être utilisée pourvu que sa fréquence puisse être spécifiée par rapport à la fréquence 9 192 631 770 Hz de la transition donnée ci-dessus ». Le NPL et la PTB considèrent cependant que, même ainsi modifiée, la formulation (1) n'est pas satisfaisante. Elle implique encore fortement que la radiation du césium est l'étalon primaire pour la réalisation du mètre.

### Recherche d'un consensus; synthèse et conclusions

Le Président pense que, d'après les divers arguments exprimés, soit par les délégués, soit dans les documents, on peut classer les différentes formulations proposées en trois groupes d'après les critères suivants :

- (A) Généralité scientifique, simplicité et clarté
- (B) Perturbation minimale du SI
- (C) Relation directe avec la mise en pratique.

Les différences d'opinion au sujet de la meilleure formulation sont dues aux poids différents donnés à ces trois critères.

Le critère A est favorable aux formulations (4) ou (5), un peu moins à la formulation (3).

Le critère B est favorable à la formulation (1).

Le critère C est favorable à la formulation (2) ou à la formulation (4).

Plusieurs délégués attribuent un grand poids à ce dernier critère mais les opinions sont divisées quant à savoir s'il joue plutôt en faveur de (2) ou en faveur de (4). La formulation (2) est appropriée pour la mesure des longueurs de l'ordre de 1 m par des méthodes interférométriques, au

laboratoire, alors que la formulation (4) est appropriée pour les déterminations de longues distances par des méthodes de mesure de temps de vol en géodésie et en astronomie. Ainsi l'UAI et les astronomes considèrent que le critère C donne l'avantage à la formulation (4). Quant aux principaux laboratoires qui sont concernés au premier chef par les mesures interférométriques, ils n'en sont pas moins divisés au sujet de l'importance relative des mesures des longues distances et des courtes distances. En particulier, le NIM, le NPL et la PTB considèrent que le critère C donne l'avantage à la formulation (2), tandis que le NRC et le NBS considèrent qu'il est également favorable à (2) et à (4).

La majorité des délégués pensent que le critère B est d'importance moindre que les deux autres. Le CCU s'est pourtant préoccupé principalement de ce critère dans ses discussions en 1980, d'où son opinion différente de celle exprimée en 1979 par le CCDM. Même si un poids faible est attribué à B, ce critère élimine probablement la formulation (5).

Aucun consensus ne se dégage pour décider si le critère A est plus ou moins important que le critère C. Néanmoins, le sentiment général est que le critère C est, au moins, suffisamment important pour rendre difficile l'acceptation de la formulation (1) ou de la formulation (3) : ces deux formulations font référence à une radiation qui est tout à fait inutilisable pour la mise en pratique. Ainsi, restent seules en lice les formulations (2) et (4); le choix de l'une ou de l'autre dépend des poids que l'on attribue aux considérations précédentes.

Pour résumer, le Président constate que la majorité des opinions exprimées à cette réunion est en faveur de la formulation (4) et que beaucoup de gens ont changé d'avis sur ce sujet au cours des dernières années et même des derniers mois. Les différences entre les formulations ne sont donc pas très significatives et la difficulté de choisir ne doit pas être une raison pour retarder le changement de définition. Il rappelle que les représentants présents du CCDM considèrent que celui-ci sera, selon toute vraisemblance, en mesure de recommander une définition fondée sur une valeur fixe de la vitesse de la lumière lors de sa prochaine session, en 1982.

Avant de clore la réunion, le Président remercie les participants pour l'efficacité des discussions qui ont permis de clarifier la situation.

Au nom de tous, Mr Bayer-Helms remercie le Président pour l'objectivité constante avec laquelle il a mené les débats jusqu'à une conclusion satisfaisante.

### Résumé des conclusions

1. Une nouvelle définition du mètre fondée sur la vitesse de la lumière doit être proposée à la CGPM en 1983, car la définition actuelle est devenue insuffisante pour les expériences les plus précises réalisées par certains laboratoires.

2. Dans ce but, le CCDM et le CCU doivent se réunir en 1982 pour soumettre au CIPM une proposition acceptable.
3. Les diverses formulations qui ont été étudiées par le Groupe de travail sont scientifiquement satisfaisantes et auront des conséquences semblables du point de vue de la technologie des mesures de longueur.
4. Les différentes préférences qui ont été exprimées résultent d'une pondération différente des considérations telles que simplicité, généralité et clarté, perturbation minimale du SI ou relation directe avec la mise en pratique.
5. Dans leur majorité, les membres du Groupe de travail se sont ralliés à une définition fondée sur le trajet parcouru par la lumière dans un intervalle de temps donné.

\*  
\* \*

### Documents présentés aux membres du Groupe de travail CCDM/CCU

Ces documents ont, pour la plupart, été distribués simultanément aux membres du CCDM et du CCU, aussi bien qu'aux membres du Groupe de travail concerné. La correspondance entre les trois numérotations est indiquée ci-dessous pour permettre l'identification des documents; la liste détaillée en est donnée en annexe M 1 (voir p. M 19) du présent rapport du Comité Consultatif pour la Définition du Mètre, 7<sup>e</sup> session, 1982.

CCDM/80-1		
80-2		
80-3		
80-4 =	CCU/81-1	
80-6	81-4	
81-1	81-5	
81-2	81-6	
81-3	81-7 =	GT-MU/N° 0
81-4	81-8	N° 1
81-5	81-9	N° 2
81-6	81-10	N° 3
81-7	81-11	N° 4
81-8	81-12	N° 5
81-9	81-13	N° 6
81-10	81-14	N° 7
81-11	81-15	N° 8
81-12	81-16	N° 9
81-13	81-17	N° 10
81-14	81-18	N° 11
81-15	81-19	N° 12

ANNEXE M 4

Données utilisées pour établir la liste  
des radiations recommandées, 1982

Cette Annexe a été établie à partir du Document CCDM/82-4 en tenant compte des données nouvelles communiquées à la 7<sup>e</sup> session du CCDM.

Les nombres entre crochets renvoient à la bibliographie commentée, 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 les faisceaux à travers ce milieu, la géométrie des faisceaux, ainsi que par d'autres effets, extérieurs au laser lui-même, liés au dispositif d'asservissement. Cette influence reste à l'intérieur des limites d'incertitude indiquées si l'on se place dans le domaine des conditions expérimentales correspondant à l'ensemble des données utilisées ci-dessous.

1.1. — Transition  $\nu_3$ ; P(7) composante  $F_2^{(2)}$  de la molécule  $\text{CH}_4$   
( $\lambda \approx 3,39 \mu\text{m}$ )

Les déterminations absolues de fréquence ont donné :

NBS, 1972 [1]	$f_{\text{CH}_4} = (88\ 376\ 181\ 627 \pm 50) \text{ kHz}$
NPL, 1976 [2]	608 $\pm$ 43
VNIIFTRI *, 1979 [3, 7]	596,4 $\pm$ 10
NRC, 1979 [4]	570 $\pm$ 200
NPL, 1980 [5]	616 $\pm$ 3
LPTF **, 1980 [6]	618 $\pm$ 13,8
VNIIFTRI, 1981 [7]	603,4 $\pm$ 1,4
LPTF, 1981 [8]	612 $\pm$ 11
IT ***, 1981 [9]	603,0 $\pm$ 3,0

\* Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques (Moscou).

\*\* Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences (Paris).

\*\*\* Institut de Thermophysique (Novosibirsk).

Les déterminations dont l'incertitude est supérieure à  $\pm 20$  kHz ne sont pas retenues pour le calcul de la moyenne; on a calculé une moyenne non pondérée.

Moyenne	$f_{\text{CH}_4} = 88\,376\,181\,608,1$ kHz,
écart-type de la moyenne	3,5 kHz.

L'incertitude due au défaut de reproductibilité de fréquence de la radiation émise par un laser asservi sur l'absorption saturée du méthane est évaluée à  $\pm 5$  kHz.

Écart-type correspondant	1,7 kHz,
incertitude composée (écart-type)	3,9 kHz,
soit en valeur relative	$0,44 \times 10^{-10}$ .

Une détermination relative (NRC, 1977 [10]) donne

$$f_{\text{CH}_4} = 88\,376\,181\,611 \text{ kHz.}$$

Valeur adoptée :

	$f_{\text{CH}_4} = 88\,376\,181\,608$ kHz,
écart-type	3,9 kHz,
écart-type relatif	$0,44 \times 10^{-10}$ .

On en déduit, pour la longueur d'onde correspondante :

	$\lambda_{\text{CH}_4} = 3\,392\,231\,397,0$ fm,
écart-type	0,15 fm,
écart-type relatif	$0,44 \times 10^{-10}$ .

[La valeur recommandée par le CCDM, 5<sup>e</sup> session, Recommandation M 1 (1973), était

$$\lambda_{\text{CH}_4} = 3\,392\,231,40 \times 10^{-12} \text{ m,}$$

avec une incertitude relative estimée à  $\pm 4 \times 10^{-9}$ , qui résulte d'un écart-type relatif estimé de  $1,3 \times 10^{-9}$ .]

1.2. — Transition 17-1; P(62), composante o, de la molécule  $^{127}\text{I}_2$  ( $\lambda \approx 576$  nm).

1.2.1. — Détermination de la fréquence de cette composante uniquement à l'aide de mesures de fréquences

NBS, 1982 [11]	$f_o = 520\,206\,808,535$ MHz,
écart-type relatif	$1,5 \times 10^{-10}$ .

1.2.2. — Détermination de la fréquence  $f_o$  à partir de  $f_i$  (voir 1.3)

La valeur suivante a été obtenue pour le rapport de la fréquence  $f_o$  de cette transition à la fréquence notée ci-après  $f_i$  :

NPL, 1982 [12]	$f_o/f_i = 1,098\,381\,317\,26,$
écart-type relatif	$1 \times 10^{-10}$ .

En utilisant la valeur de  $f_i$  et son écart-type (voir 1.3.4), on obtient

$$f_o = 520\,206\,808,362 \text{ MHz,}$$

$$\text{écart-type relatif} \quad 3,5 \times 10^{-10}.$$

1.2.3. — Valeur moyenne de la fréquence  $f_o$

A l'aide des valeurs de  $f_o$  données en 1.2.1 et 1.2.2, on calcule une moyenne pondérée (voir, dans la liste des radiations recommandées, 1982, la Note \*\*)

$$f_o = 520\,206\,808,508 \text{ MHz.}$$

Le calcul de l'écart-type de cette moyenne conduit, en tenant compte de la pondération, à la valeur 0,063 MHz. Étant donné le petit nombre de déterminations, le CCDM a estimé prudent de calculer l'écart-type sans tenir compte de la pondération; on obtient 0,106 MHz.

Valeur adoptée

$$f_o = 520\,206\,808,51 \text{ MHz,}$$

$$\text{écart-type} \quad 0,11 \text{ MHz,}$$

$$\text{écart-type relatif} \quad 2,0 \times 10^{-10};$$

d'où

$$\lambda_o = 576\,294\,760,27 \text{ fm,}$$

$$\text{écart-type} \quad 0,12 \text{ fm,}$$

$$\text{écart-type relatif} \quad 2,0 \times 10^{-10}.$$

1.3. — Transition 11-5; R(127), composante i, de la molécule  $^{127}\text{I}_2$   
( $\lambda \approx 633 \text{ nm}$ )

1.3.1. — Détermination de la fréquence de cette composante à partir de  $f_{\text{CH}_4}$

On peut déterminer le rapport de cette fréquence  $f_i$  à celle du méthane de façon indirecte en utilisant une autre radiation (autre composante de la même transition ou bien autre transition de  $^{127}\text{I}_2$  ou  $^{129}\text{I}_2$ ); si  $f_x$  est la fréquence de cette radiation et  $\lambda_x$  sa longueur d'onde dans le vide, on détermine  $f_x/f_{\text{CH}_4}$  par la mesure de  $\lambda_{\text{CH}_4}/\lambda_x$  et on calcule le rapport cherché en tenant compte de la différence des fréquences :

$$\frac{f_i}{f_{\text{CH}_4}} = \frac{f_x}{f_{\text{CH}_4}} + \frac{f_i - f_x}{f_{\text{CH}_4}} = \frac{\lambda_{\text{CH}_4}}{\lambda_x} + \frac{f_i - f_x}{f_{\text{CH}_4}}$$

A partir des valeurs

NBS, 1976 [13]	$f_i/f_{\text{CH}_4} = 5,359\,048\,173\,77 \times (1 \pm 0,22 \times 10^{-9})$
NPL, 1982 [12]	$172\,57 \times (1 \pm 0,2 \times 10^{-9})$
PTB, 1982 [14]	$174\,3 \times (1 \pm 0,35 \times 10^{-9})$

on obtient les valeurs de  $f_i$  correspondantes

NBS, 1976	$f_i = 473\,612\,214\,651$ kHz
NPL, 1982	545
PTB, 1982	698

On dispose aussi des valeurs suivantes, de moindre précision; elles ne sont pas retenues.

NPL, 1979 [15]	$f_i/f_{\text{CH}_4} = 5,359\,048\,172\,54 \times (1 \pm 1,5 \times 10^{-9})$
PTB, 1979 [16]	$186 \times (1 \pm 2 \times 10^{-9})$
IMM, 1981 [17]	$164\,69 \times (1 \pm 3,6 \times 10^{-9})$

1.3.2. — *Détermination de la fréquence  $f_i$  à partir de la fréquence de la transition R(12) du  $\text{CO}_2$  ( $\lambda \approx 9,3 \mu\text{m}$ )*

A partir de la valeur

NPL, 1978 [18]	$f_i/f_{\text{CO}_2} = 14,719\,388\,536 \times (1 \pm 0,4 \times 10^{-9})$
----------------	--

et en prenant la valeur donnée

$$f_{\text{CO}_2} = (32\,176\,079\,482 \pm 14) \text{ kHz},$$

on obtient

$$f_i = 473\,612\,215\,461 \times (1 \pm 0,6 \times 10^{-9}) \text{ kHz}.$$

On dispose aussi de la valeur suivante, de moindre précision, non retenue

NPL, 1974 [19]	$f_i/f_{\text{CO}_2} = 14,719\,388\,548 \times (1 \pm 1,4 \times 10^{-9})$
----------------	--

1.3.3. — *Détermination de la fréquence  $f_i$  uniquement à l'aide de mesures de fréquences*

NBS, 1982 [20]	$f_i = 473\,612\,214\,827$ kHz
écart-type relatif	$1,6 \times 10^{-10}$ .

1.3.4. — *Valeur moyenne de la fréquence  $f_i$*

L'ensemble des valeurs de  $f_i$  indiquées en 1.3.1, 1.3.2 et 1.3.3 donne :

Moyenne non pondérée	$f_i = 473\,612\,214\,836$ kHz,
écart-type de la moyenne	163 kHz.

Valeur adoptée :

$f_i =$	473 612 214,8 MHz,
écart-type	0,16 MHz,
écart-type relatif	$3,4 \times 10^{-10}$ ;

d'où

$\lambda_i =$	632 991 398,1 fm,
écart-type	0,22 fm,
écart-type relatif	$3,4 \times 10^{-10}$ .

[La valeur recommandée par le CCDM, 5<sup>e</sup> session, Recommandation M 1 (1973), était

$$\lambda_i = 632\,991,399 \times 10^{-12} \text{ m,}$$

avec une incertitude relative estimée à  $\pm 4 \times 10^{-9}$ , qui résulte d'un écart-type relatif estimé de  $1,3 \times 10^{-9}$ .]

1.4. — *Transition 9-2; R(47), composante o, de la molécule  $^{127}\text{I}_2$  ( $\lambda \approx 612 \text{ nm}$ )*

Les valeurs suivantes ont été obtenues pour le rapport de la fréquence  $f'_0$  de cette transition à la fréquence notée ci-dessus  $f_i$ :

LHA-BIPM, 1979 [21]	$f'_0/f_i = 1,034\,349\,072\,88 \times (1 \pm 3 \times 10^{-10})$
BIPM, 1979 [22]	$072\,21 \times (1 \pm 3,6 \times 10^{-10})$
PTB, 1980 [23]	$072\,57 \times (1 \pm 3,4 \times 10^{-10})$
NPL, 1982 [12]	$072\,43 \times (1 \pm 1 \times 10^{-10})$
BIPM, 1982 [24]	$071\,90 \times (1 \pm 2,1 \times 10^{-10})$

Moyenne non pondérée  $f'_0/f_i = 1,034\,349\,072\,40$ ,  
écart-type de la moyenne  $1,6 \times 10^{-10}$ .

On en déduit

$$\begin{aligned} f'_0 &= 489\,880\,355,1 \text{ MHz,} \\ \text{écart-type} &0,18 \text{ MHz,} \\ \text{écart-type relatif} &3,7 \times 10^{-10}; \end{aligned}$$

d'où  $\lambda'_0 = 611\,970\,769,8 \text{ fm,}$

$$\begin{aligned} \text{écart-type} &0,23 \text{ fm,} \\ \text{écart-type relatif} &3,7 \times 10^{-10}. \end{aligned}$$

[La valeur indiquée par le CCDM, 6<sup>e</sup> session, 1979, était

$$\lambda'_0 = 611\,970\,771 \text{ fm,}$$

avec une incertitude relative estimée à  $\pm 4 \times 10^{-9}$ , qui résulte d'un écart-type de  $1,3 \times 10^{-9}$ .]

1.5. — *Transition 43-0; P(13), composante  $a_3$  (quelquefois dénommée composante s) de la molécule  $^{127}\text{I}_2$  ( $\lambda \approx 515 \text{ nm}$ )*

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

BIPM, 1979 [25]	$f_{a_3}/f_i = 1,229\,889\,317\,61 \times (1 \pm 4,3 \times 10^{-10})$
PTB, 1979 [26]	$318\,15 \times (1 \pm 5 \times 10^{-10})$
NPL, 1982 [12]	$316\,88 \times (1 \pm 1 \times 10^{-10})$
BIPM, 1982 [27]	$316\,88 \times (1 \pm 2,5 \times 10^{-10})$

Moyenne non pondérée  $f_a/f_i = 1,229\ 889\ 317\ 38$ ,  
 écart-type de la moyenne  $3,1 \times 10^{-10}$ .

On en déduit

$f_{a_3} = 582\ 490\ 603,6$  MHz,  
 écart-type  $0,25$  MHz,  
 écart-type relatif  $4,3 \times 10^{-10}$ .

d'où  $\lambda_{a_3} = 514\ 673\ 466,2$  fm,  
 écart-type  $0,22$  fm,  
 écart-type relatif  $4,3 \times 10^{-10}$ .

[La valeur indiquée par le CCDM, 6<sup>e</sup> session, 1979, était

$$\lambda_{a_3} = 514\ 673\ 467 \text{ fm,}$$

avec une incertitude relative estimée à  $\pm 4 \times 10^{-9}$ , qui résulte d'un écart-type de  $1,3 \times 10^{-9}$ .]

### 2.1. — Transition $2p_{10}-5d_5$ de l'atome $^{86}\text{Kr}$ ( $\lambda \approx 606$ nm)

Soit  $f_{Kr}$  la fréquence de la radiation correspondant à cette transition et émise dans les conditions recommandées par le CIPM [28, 29]; d'après la définition du mètre (1960) [29] et compte tenu de la valeur expérimentale moyenne obtenue à partir de  $\lambda_{Kr}$  [30] pour la longueur d'onde de la radiation correspondant à la composante  $i$  de la transition 11-5; R(127) de la molécule  $^{127}\text{I}_2$ , on peut calculer le rapport

$$\begin{aligned} f_{Kr}/f_i &= (\lambda_i)_{Kr} \times (1/\lambda_{Kr}) \\ &= 632\ 991\ 398,5 \times 10^{-15} \times 1\ 650\ 763,73 = 1,044\ 919\ 242\ 05 \end{aligned}$$

d'où  $f_{Kr} = 494\ 886\ 516,5$  MHz,  
 écart-type  $0,6$  MHz,  
 écart-type relatif  $1,3 \times 10^{-9}$ ;

et  $\lambda_{Kr} = 605\ 780\ 210,2$  fm,  
 écart-type  $0,8$  fm,  
 écart-type relatif  $1,3 \times 10^{-9}$ .

Les incertitudes relatives sur les valeurs de  $f_{Kr}/f_i$  et de  $f_i$  ou  $\lambda_{Kr}$  sont estimées à  $\pm 4 \times 10^{-9}$ ; elles sont pratiquement égales à l'incertitude relative observée dans la réalisation de la précédente définition du mètre (1960) et peuvent être caractérisées par un écart-type relatif de  $1,3 \times 10^{-9}$ .

[Selon cette définition, la radiation étalon avait pour longueur d'onde

$$\begin{aligned} \lambda_{Kr} &= (1/1\ 650\ 763,73) \text{ m} \\ &= 605\ 780\ 210,6 \text{ fm} \end{aligned}$$

avec une incertitude relative estimée à l'époque à  $\pm 1 \times 10^{-8}$ .]

### Bibliographie commentée

- [1] EVENSON, K. M., WELLS, J. S., PETERSEN, F. R., DANIELSON, B. L., DAY, G. W., BARGER, R. L. and HALL, J. L., Speed of light from direct frequency and wavelength measurements of the methane-stabilized laser. *Phys. Rev. Lett.*, **29**, No. 19, 1972, pp. 1346-1349.
- [2] BLANEY, T. G., EDWARDS, G. J., JOLLIFFE, B. W., KNIGHT, D. J. E. and WOODS, P. T., Absolute frequencies of the methane-stabilized He-Ne laser (3.39  $\mu\text{m}$ ) and the  $\text{CO}_2$ , R(32) stabilized laser (10.17  $\mu\text{m}$ ). *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **9**, 1976, pp. 1323-1330.
- [3] DOMNIN, Y. S., KOSHELJAEVSKY, N. B., TATARENKOV, V. M. and SHUMJATSKY, P. S., Precise frequency measurements in submillimeter and infrared region. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM 29**, No. 4, 1980, pp. 264-267.
- [4] BAIRD, K. M., SMITH, D. S. and WHITFORD, B. G., Confirmation of the currently accepted value 299 792 458 metres per second for the speed of light. *Opt. Commun.*, **31**, No. 3, 1979, pp. 367-368.
- [5] KNIGHT, D. J. E., EDWARDS, G. J., PEARCE, P. R. and CROSS, N. R., Measurement of the frequency of the 3.39  $\mu\text{m}$  methane-stabilized laser to  $\pm 3$  parts in  $10^{11}$ . *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM 29**, No. 4, 1980, pp. 257-264.
- [6] CLAIRON, A., DAHMANI, B. and RUTMAN, J., Accurate absolute frequency measurements on stabilized  $\text{CO}_2$  and He-Ne infrared lasers. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM 29**, No. 4, 1980, pp. 268-272.
- [7] DOMNIN, Y. S., KOSHELJAEVSKY, N. B., TATARENKOV, V. M. and SHUMJATSKY, P. S., Measurement of the frequency of a He-Ne/ $\text{CH}_4$  laser. *JETP Letters*, **34**, No. 4, 1981, pp. 167-170.
- [8] Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences (France), Rapport d'activité, 1981, pp. 24-31.
- [9] CHEBOTAYEV, V. P., Optical time scale. *J. Phys. (Paris)*, Colloque C8, **42**, suppl. au N° 12, 1981, pp. C8-505-512.
- [10] WHITFORD, B. G. and SMITH, D. S., Frequency of the methane-stabilized He-Ne laser at 3.39  $\mu\text{m}$  measured relative to the 10.17  $\mu\text{m}$  R(32) transition of the  $\text{CO}_2$  laser. *Opt. Commun.*, **20**, No. 2, 1977, pp. 280-283.
- [11] NBS measurement of frequencies in the visible and near I.R. Document CCDM/82-30.

Ce document donne la valeur 520 206 808 547 kHz; cette valeur a été diminuée de 12 kHz à la demande des représentants du NBS à la 7<sup>e</sup> session du CCDM.

- [12] NPL, Laser wavelength measurements. Document CCDM/82-34.

Dans ce document, toutes les valeurs doivent être corrigées de  $3,5 \times 10^{-11}$  en valeur relative; en effet, la fréquence du laser à  $\lambda \approx 633 \text{ nm}$

doit être augmentée car la température du queusot de la cuve à iode était de 16 °C au lieu de 15 °C, température de référence retenue pour ce type de laser.

On a considéré que les incertitudes indiquées correspondent à un écart-type.

- [13] LAYER, H. P., DESLATTES, R. D. and SCHWEITZER, W. G., Laser wavelength comparison by high resolution interferometry. *Applied Optics*, **15**, No. 3, 1976, pp. 734-743.

Cette publication donne

$$\lambda_{\text{CH}_4}/\lambda_{i^{291},k,4^\circ\text{C}} = 5,359\,049\,260\,6 \times (1 \pm 2 \times 10^{-10}).$$

En tenant compte des mesures effectuées au CSIRO et au NPL, on admet

$$f_{i^{271},i,15^\circ\text{C}} - f_{i^{291},k,4^\circ\text{C}} = (-96\,050 \pm 50) \text{ kHz},$$

soit

$$(f_{i^{271},i,15^\circ\text{C}} - f_{i^{291},k,4^\circ\text{C}})/f_{\text{CH}_4} = (-1,086\,83 \pm 0,000\,58) \times 10^{-6}.$$

- [14] BÖNSCH, G., Wavelength comparison between methane and iodine stabilized He-Ne lasers. Document CCDM/82-41.

- [15] NPL, 1979. Résultat non publié communiqué par W. R. C. Rowley :

$$\lambda_{\text{CH}_4}/\lambda_{i^{271},d,18^\circ\text{C}} = 5,359\,050\,040\,4 \times (1 \pm 1,5 \times 10^{-9}).$$

En tenant compte des mesures effectuées au cours de diverses comparaisons internationales, on admet

$$f_{i^{271},i,15^\circ\text{C}} - f_{i^{271},d,18^\circ\text{C}} = (-165\,074 \pm 4) \text{ kHz},$$

soit

$$(f_{i^{271},i,15^\circ\text{C}} - f_{i^{271},d,18^\circ\text{C}})/f_{\text{CH}_4} = (-1,867\,86 \pm 0,000\,05) \times 10^{-6}.$$

- [16] BÖNSCH, G., Wavelength comparisons. Document CCDM/79-20.

- [17] KAPRALOV, V. P., MALYSHEV, G. M., PAVLOV, P. A., PRIVALOV, V. E., FOFANOV, Y. A. and ETSIN, I. S., Measurement of the wavelength ratio of lasers stabilized by saturated absorption in iodine and methane. *Opt. Spectrosc. (USSR)*, **50**, 1981, pp. 34-37.

Cette publication donne

$$\lambda_{\text{CH}_4}/\lambda_{i^{271},d} = 5,359\,050\,033 \pm 3,55 \times 10^{-9}$$

(pour un niveau de confiance de 0,95).

A partir de

$$f_{i^{271},i} - f_{i^{271},d} = (-165\,114 \pm 2) \text{ kHz (Document CCDM/82-29)}$$

on calcule

$$(f_{i^{271},i} - f_{i^{271},d})/f_{\text{CH}_4} = (-1,868\,31 \pm 0,000\,02) \times 10^{-6}.$$

- [18] BLANEY, T. G., BRADLEY, C. C., EDWARDS, G. J., KNIGHT, D. J. E., WOODS, P. T. and JOLLIFFE, B. W., Absolute frequency measurement of the R(12) transition of CO<sub>2</sub> at 9.3 μm. *Nature*, **244**, No. 5417, 1973, p. 504.

Cette publication donne

$$f_{\text{CO}_2} = (32\,176\,079\,482 \pm 28) \text{ kHz.}$$

- BLANEY, T. G., BRADLEY, C. C., EDWARDS, G. J., JOLLIFFE, B. W., KNIGHT, D. J. E., ROWLEY, W. R. C., SHOTTON, K. C. and WOODS, P. T., Measurement of the speed of light : I. Introduction and frequency measurement of a carbon dioxide laser. *Proc. R. Soc. Lond. A*, **355**, 1977, pp. 61-88.

Cette publication rectifie comme suit la valeur précédente en donnant la fréquence au centre de la raie; l'incertitude a été réévaluée :

$$f_{\text{CO}_2} = (32\,176\,079\,472 \pm 14) \text{ kHz.}$$

Toutefois, pour la détermination de  $f_i$  à partir du rapport  $f_i/f_{\text{CO}_2}$ , mesuré au NPL, à la demande du représentant de ce laboratoire, on doit prendre

$$f_{\text{CO}_2} = (32\,176\,079\,482 \pm 14) \text{ kHz.}$$

- WOODS, P. T., SHOTTON, K. C., and ROWLEY, W. R. C., Frequency determination of visible laser light by interferometric comparison with upconverted CO<sub>2</sub> laser radiation. *Applied Optics*, **17**, 1978, pp. 1048-1054.

Cette publication donne

$$f_{1271, d, 18^\circ\text{C}}/f_{\text{CO}_2} = 14,719\,393\,666 \times (1 \pm 0,4 \times 10^{-9}).$$

Au moyen de la valeur de

$$f_{1271, d, 18^\circ\text{C}} - f_{1271, i, 15^\circ\text{C}} \text{ donnée en [15],}$$

on calcule

$$(f_{1271, i, 15^\circ\text{C}} - f_{1271, d, 18^\circ\text{C}})/f_{\text{CO}_2} = (-5,130\,33 \pm 0,000\,12) \times 10^{-6}.$$

- [19] JOLLIFFE, B. W., ROWLEY, W. R. C., SHOTTON, K. C., WALLARD, A. J. and WOODS, P. T., Accurate wavelength measurement on up-converted CO<sub>2</sub> laser radiation. *Nature*, **251**, No. 5470, 1974, pp. 46-47.

Cette publication donne la valeur

$$\lambda_{\text{CO}_2} = 9\,317\,246\,348 \text{ fm,}$$

obtenue par la mesure du rapport  $\lambda_{\text{CO}_2}/\lambda_{1271, d, 18^\circ\text{C}}$  et en utilisant pour  $\lambda_{1271, d, 18^\circ\text{C}}$  la valeur 632 991 178,3 fm, déduite de la valeur recommandée

pour la composante  $i$ : 632 991 399 fm (*Procès-Verbaux CIPM*, 62<sup>e</sup> session, 1973, p. 112) et de la valeur

$$f_{i_{271,2,d}} - f_{i_{271,2,i}} = 165\,114 \text{ kHz (Document CCDDM/82-29).}$$

On peut donc recalculer le rapport

$$f_{i_{271,2,d,18^\circ\text{C}}}/f_{\text{CO}_2} = \lambda_{\text{CO}_2}/\lambda_{i_{271,2,d,18^\circ\text{C}}} = 14,719\,393\,678;$$

l'incertitude indiquée pour la valeur mesurée de ce rapport est  $1,4 \times 10^{-9}$ .

Pour se ramener à la composante  $i$ , on termine le calcul comme ci-dessus en [18].

- [20] NBS measurement of frequencies in the visible and near I.R. Document CCDDM/82-30.

Ce document donne la valeur 473 612 214 789 kHz; par lettre du 1<sup>er</sup> février 1983, le NBS a modifié cette valeur qui devient 473 612 214 827 kHz (à paraître dans *Optics Letters*, 8, 1983); l'incertitude a été portée à 76 kHz (écart-type).

- [21] BENNETT, S. J., CÉREZ, P., HAMON, J. and CHARTIER, A., Wavelength of a helium-neon laser stabilized by saturated absorption in iodine at 612 nm. *Metrologia*, 15, 1979, p. 125.

Cette publication donne la valeur

$$\lambda'_i = 611\,970\,458,6 \text{ fm,}$$

obtenue par la mesure du rapport  $\lambda'_i/\lambda_i$  et en utilisant pour  $\lambda_i$  la valeur recommandée. On peut donc recalculer le rapport

$$f'_i/f_i = \lambda_i/\lambda'_i = 1,034\,349\,599\,89.$$

L'incertitude relative indiquée pour la valeur mesurée de ce rapport est  $3 \times 10^{-10}$  (écart-type).

On admet

$$f'_0 - f'_i = (-249\,600 \pm 40) \text{ kHz (Document CCDDM/82-29),}$$

soit

$$(f'_0 - f'_i)/f'_i = (-0,527\,01 \pm 0,000\,08) \times 10^{-6}.$$

- [22] *Procès-Verbaux CIPM*, 68<sup>e</sup> session, 1979, p. 33.

La radiation de référence est la même que ci-dessus; on a trouvé

$$\lambda'_i = 611\,970\,459,0 \text{ fm,}$$

ce qui donne

$$f'_i/f'_i = 1,034\,349\,599\,22;$$

l'incertitude relative indiquée pour la valeur mesurée de ce rapport est  $3,6 \times 10^{-10}$  (écart-type).

- [23] BÖNSCH, G., Wellenlängenvergleich von  $J_2$ -stabilisierten He-Ne-Lasern mit 612 nm und 633 nm Wellenlänge. *PTB-Jahresbericht*, 1980, p. 139.

Ce document donne le rapport

$$f_i/f'_0 = \lambda'_0/\lambda_i = 0,966\,791\,605\,0 \times (1 \pm 3,4 \times 10^{-10}).$$

- [24] Document CCDM/82-19a et *Procès-Verbaux CIPM*, 71<sup>e</sup> session, 1982 (à paraître).

Ce document donne :

$$\lambda_d/\lambda'_0 = f'_0/f_d = 1,034\,348\,711\,3 \times (1 \pm 2,1 \times 10^{-10}).$$

On peut calculer  $f'_0/f_i$  par la relation

$$f'_0/f_i = [1 - (f_i - f_d)/f_i] \times f'_0/f_d$$

avec

$$f_i - f_d = -165\,114 \text{ kHz (Document CCDM/82-29)}$$

et

$$f_i = 473\,612\,214,8 \text{ MHz.}$$

- [25] *Procès-Verbaux CIPM*, 68<sup>e</sup> session, 1979, p. 32.

On donne la valeur  $\lambda_{a_3} = 514\,673\,466,9 \text{ fm}$ , obtenue à partir de la valeur recommandée de  $\lambda_1$ ; on peut donc recalculer le rapport  $f_i/f_{a_3} = \lambda_{a_3}/\lambda_1$ ; l'incertitude relative indiquée pour la valeur de ce rapport est  $4,3 \times 10^{-10}$  (écart-type).

- [26] BÖNSCH, G., Wavelength comparisons. Document CCDM/79-20.

Ce document donne

$$\lambda_{a_3}/\lambda_1 = 0,813\,081\,295\,4 \times (1 \pm 5 \times 10^{-10}).$$

- [27] Document CCDM/82-19a et *Procès-Verbaux CIPM*, 71<sup>e</sup> session, 1982 (à paraître).

Ce document donne

$$\lambda_{a_3}/\lambda_d = f_d/f_{a_3} = 0,813\,081\,579\,7 \times (1 \pm 2,9 \times 10^{-10}).$$

On peut calculer  $f_{a_3}/f_i$  par la relation

$$f_{a_3}/f_i = [1 - (f_i - f_d)/f_i] / (f_d/f_{a_3})$$

avec

$$f_i - f_d = -165\,114 \text{ kHz (Document CCDM/82-29)}$$

et

$$f_i = 473\,612\,214,8 \text{ MHz.}$$

- [28] *Procès-Verbaux CIPM*, 49<sup>e</sup> session, 1960, pp. 71-72.
- [29] *Comptes Rendus 11<sup>e</sup> CGPM*, 1960, p. 85.
- [30] *CCDM*, 5<sup>e</sup> session, 1973, p. M 15.

*Note du BIPM.* Cette publication donne  $(\lambda_i)_{Kr} = 632\,991\,398,5$  fm. Des mesures ultérieures ont été réalisées à l'IMGC (Conférence AMCO, 1975, pp. 431-435), au NRLM (*Metrologia*, **14**, 1978, pp. 47-51 et Doc. CCDM/79-3), à l'IMM (Doc. CCDM/78-12), au CSIRO (Doc. CCDM/78-3), au NPRL (*S. Afr. J. Phys.*, **4**, 1981, pp. 1-4). La prise en compte des résultats de ces mesures conduirait à une valeur moyenne de  $(\lambda_i)_{Kr}$  qui ne différerait de cette donnée ci-dessus que d'une quantité inférieure à l'incertitude estimée.

Novembre 1982, révisé mars 1983

---

ANNEXE M 5

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

Les notations des composantes hyperfines sont celles utilisées dans la bibliographie citée; la notation systématique proposée dans le document CCDM/82-32 a aussi été indiquée.

La classification des composantes hyperfines donnée dans les références [26] et [29] a été complétée en tenant compte de calculs effectués au BIPM (Rapport BIPM-83/5).

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

Pour les valeurs des incertitudes, on a tenu compte :

- des incertitudes données par les auteurs,
- de la dispersion des différentes déterminations pour une même composante,
- et de la proximité éventuelle de composantes perturbatrices.

TABLEAU 1

(unité : MHz;  $s$  : estimation de l'écart-type)

$$\lambda = 515 \text{ nm}, \text{}^{127}\text{I}_2$$

$$\text{P}(13) 43-0$$

Référence : composante  $a_3$ ,  $f = 582\,490\,603,6$  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] à [5]

TABLEAU 2

(unité : MHz;  $s$  : estimation de l'écart-type)

$$\lambda = 515 \text{ nm}, \text{}^{127}\text{I}_2$$

$$\mathbf{R(15) 43-0}$$

- Références
- composante  $a_3$ , P(13) 43-0,  $f = 582\,490\,603,6$  MHz [1]
  - $f(a_1) - f(a_3) = [-131,770 \pm 0,001]$  MHz, (Tableau 1)
  - $f(b_1) - f(a_1) = [283,835 \pm 0,005]$  MHz [3] [6]

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;  $s$  : estimation de l'écart-type)

$$\lambda = 515 \text{ nm}, \text{}^{127}\text{I}_2$$

$$\mathbf{R(98) 58-1}$$

- Références
- composante  $a_3$ , P(13) 43-0,  $f = 582\,490\,603,6$  MHz [1]
  - $f(d_6) - f(a_3) = [-2\,100 \pm 1]$  MHz [7]

Composante	$f(d'_n) - f(d_6)$	$s$	Composante	$f(d_n) - f(d_6)$	$s$
$d_1$ 1	- 413,488	0,005	$d_8$ 8	200,478	0,005
$d_2$ 2	- 359,553	0,005	$d_9$ 9	225,980	0,005
$d_3$ 3	- 194,521	0,005	$d_{10}$ 10	253	1
$d_4$ 4	- 159,158	0,005	$d_{11}$ 11	254	1
$d_5$ 5	- 105,769	0,005	$d_{12}$ 12	314,131	0,005
$d_6$ 6	0	—	$d_{13}$ 13	426,691	0,005
$d_7$ 7	172,200	0,005	$d_{14}$ 14	481,574	0,005
			$d_{15}$ 15	510,246	0,005

Réf. [4], [6], [7]

TABLEAU 4

(unité : MHz;  $s$  : estimation de l'écart-type)

$$\lambda = 576 \text{ nm}, {}^{127}\text{I}_2$$

$$\text{P(62) 17-1}$$

Référence : composante o ( $a_1$ ),  $f = 520\,206\,808,51$  MHz [1]

Composante	$f(a_n) - f(o)$	$s$	Composante	$f(a_n) - f(o)$	$s$
$a_1$ o	0	—	$a_6$ j	418,7	1,0
$a_2$ n	275,5	1,0	$a_7$ i	430,1	1,0
$a_3$ m	287,3	1,0	$a_8$ h	438,7	1,0
$a_4$ l	293,5	1,0	$a_9$ g	452,0	1,0
$a_5$ k	306,6	1,0	$a_{10}$ f	579,4	1,0

Réf. [8]

TABLEAU 5

(unité : MHz;  $s$  : estimation de l'écart-type)

$$\lambda = 612 \text{ nm}, {}^{127}\text{I}_2$$

$$\text{R(47) 9-2}$$

Référence : composante o ( $a_7$ ),  $f = 489\,880\,355,1$  MHz [1]

Composante	$f(a_n) - f(o)$	$s$	Composante	$f(a_n) - f(o)$	$s$
$a_1$ u	- 357,15	0,08	$a_{11}$ k	119,12	0,05
$a_2$ t	- 333,99	0,05	$a_{12}$ j	219,64	0,05
$a_3$ s	- 312,5	0,3	$a_{13}$ i	249,63	0,10
$a_4$ r	- 86,18	0,10	$a_{14}$ h	284,36	0,10
$a_5$ q	- 47,30	0,05	$a_{15}$ g	358,35	0,20
$a_6$ p	- 36,84	0,10	$a_{16}$ f	384,76	0,20
$a_7$ o	0	—	$a_{17}$ e	403,84	0,20
$a_8$ n	81,46	0,10	$a_{18}$ d	430,04	0,10
$a_9$ m	99,13	0,10	$a_{19}$ c	527,20	0,10
$a_{10}$ l	107,52	0,05	$a_{20}$ b	539,32	0,10
			$a_{21}$ a	555,23	0,20

Réf. [9], [10], [11]

TABLEAU 6

(unité : MHz;  $s$  : estimation de l'écart-type)

$$\lambda = 612 \text{ nm}, {}^{129}\text{I}_2$$

**P(110) 10-2**Référence : composante o ( $a_7$ ) de R(47) 9-2,  ${}^{127}\text{I}_2$ ,

$$f = 489\,880\,355,1 \text{ MHz [1]}$$

Composante $f(a_n) - f(o, {}^{127}\text{I}_2)$				Composante $f(a_n) - f(o, {}^{127}\text{I}_2)$			
			$s$				$s$
$a_1$	$b'$	- 376,29	0,05	$a_{15}$	n	1,61	0,20
$a_2$	$a'$	- 244,76	0,10	$a_{16}$	m	10,63	0,15
$a_3$	z	- 230,79	0,20	$a_{17}$	l	15,82	0,20
$a_4$	y	- 229,40	0,20	$a_{18}$	k	25,32	0,10
$a_5$	x	- 216,10	0,05	$a_{19}$	j	49,44	0,15
$a_6$	w	- 149,37	0,10	$a_{20}$	i	54,66	0,20
$a_7$	v	- 134,68	0,10	$a_{21}$	h	69,02	0,10
$a_8$	u	- 130,98	0,10	$a_{22}$	g	74,47	0,15
$a_9$	t	- 116,67	0,05	$a_{23}$	f	110,60	0,10
$a_{10}$	s	- 96,26	0,20	$a_{24}$	e	153,09	0,20
$a_{11}$	r	- 90,70	0,20	$a_{25}$	d	154,70	0,20
$a_{12}$	q	- 84,12	0,20	$a_{26}$	c	163,98	0,20
$a_{13}$	p	- 77,79	0,20	$a_{27}$	b	166,22	0,20
$a_{14}$	o	- 72,70	0,20	$a_{28}$	a	208,29	0,10

Réf. [10], [12], [13]

TABLEAU 7

(unité : MHz;  $s$  : estimation de l'écart-type)

$$\lambda = 612 \text{ nm}, {}^{129}\text{I}_2$$

**R(113) 14-4**Référence : composante o ( $a_7$ ) de R(47) 9-2,  ${}^{127}\text{I}_2$ ,

$$f = 489\,880\,355,1 \text{ MHz [1]}$$

Composante $f(b_n) - f(o, {}^{127}\text{I}_2)$				Composante $f(b_n) - f(o, {}^{127}\text{I}_2)$			
			$s$				$s$
$b_{19}$	r	- 410,4	0,3	$b_{28}$	i	- 289,4	0,5
$b_{20}$	q	- 390,0	0,3	$b_{29}$	h	- 273,1	0,3
$b_{21}$	p	- 383,9	0,5	$b_{30}$	g	- 255,7	0,5
$b_{22}$	o	- 362,8	0,3	$b_{31}$	f	- 247	5,0
$b_{23}$	n	- 352,9	0,3	$b_{32}$	e	- 237	5,0
$b_{24}$	m	- 346,4	0,3	$b_{33}$	d	- 223	5,0
$b_{25}$	l	- 330,0	0,3	$b_{34}$	c	- 198,6	0,3
$b_{26}$	k	- 324,9	0,3	$b_{35}$	b	- 193,1	0,3
$b_{27}$	j	- 304,7	0,3	$b_{36}$	a	- 187,0	0,3

Réf. [12], [13]

TABLEAU 8

(unité : MHz;  $s$  : estimation de l'écart-type)

$$\lambda = 633 \text{ nm}, {}^{127}\text{I}_2$$

**R(127) 11-5**

Référence : composante  $i$  ( $a_{13}$ ),  $f = 473\,612\,214,8$  MHz [1]

Composante	$f(a_n) - f(i)$	$s$	Composante	$f(a_n) - f(i)$	$s$
$a_2$ 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	- 320,6	0,1	$a_{14}$ h	21,939	0,005
$a_5$ q	- 292,7	0,5	$a_{15}$ g	125,694	0,005
$a_6$ p	- 290,3	0,5	$a_{16}$ f	138,892	0,005
$a_7$ o	- 263,0	0,1	$a_{17}$ 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. [14] à [22]

TABLEAU 9

(unité : MHz;  $s$  : estimation de l'écart-type)

$$\lambda = 633 \text{ nm}, {}^{127}\text{I}_2$$

**P(33) 6-3**

Références  $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ composante } i \text{ (} a_{13} \text{), R(127) 11-5, } f = 473\,612\,214,8 \text{ MHz [1]} \\ \bullet f(b_{21}) - f(i, \text{ R(127) 11-5) = } [-\,393,5 \pm 0,1] \text{ MHz [22]} \end{array} \right.$

Composante	$f(b_n) - f(b_{21})$	$s$	Composante	$f(b_n) - f(b_{21})$	$s$
$b_1$ u	- 915,7	0,5	$b_{11}$ k	- 435,0	0,5
$b_2$ t	- 888,3	0,5	$b_{12}$ j	- 347,3	0,2
$b_3$ s	- 863,0	0,5	$b_{13}$ i	- 310,2	0,2
$b_4$ r	- 655,1	0,5	$b_{14}$ h	- 263,5	0,2
$b_5$ q	- 605,5	0,5	$b_{15}$ g	- 214,5	0,2
$b_6$ p	- 589,0	0,5	$b_{16}$ f	- 179,2	0,2
$b_7$ o	- 543,0	0,5	$b_{17}$ e	- 153,9	0,2
$b_8$ n	- 482,9	0,5	$b_{18}$ d	- 118,2	0,2
$b_9$ m	- 456,0	0,5	$b_{19}$ c	- 36,8	0,2
$b_{10}$ l	- 449,5	0,5	$b_{20}$ b	- 22,0	0,2
			$b_{21}$ a	0	—

Réf. [22], [23]

TABLEAU 10

(unité : MHz;  $s$  : estimation de l'écart-type)

$$\lambda = 633 \text{ nm}, {}^{129}\text{I}_2$$

$$\text{P(54) 8-4}$$

Références  $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ composante } i(a_{13}), \text{ R(127) 11-5, } {}^{127}\text{I}_2, f = 473\,612\,214,8 \text{ MHz [1]} \\ \bullet f(k(a_{28})) - f(i, \text{ R(127) 11-5, } {}^{127}\text{I}_2) = [95,90 \pm 0,04] \text{ MHz [24, 25]} \end{array} \right.$

Composante	$f(a_n) - f(k)$	$s$	Composante	$f(a_n) - f(k)$	$s$
$a_2$ $z'$	- 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	$a_{23}$ $a'$	- 98,21	0,05
$a_{11}$ $q'$	- 298,2	1	$a_{24}$ $n_2$	- 56*	1
$a_{12}$ $p'$	- 293,1	1	$a_{25}$ $n_1$		
$a_{13}$ $o'$	- 289,7	1	$a_{26}$ $m_2$	- 43,1	0,5
$a_{14}$ $n'$	- 282,7	1	$a_{27}$ $m_1$	- 41,2	0,5
			$a_{28}$ $k$	0	—

Réf. [26] à [30]

\* aussi composante  $m_0$  de P(33) 6-3,  ${}^{127}\text{I}^{129}\text{I}$ .

TABLEAU 11

(unité : MHz;  $s$  : estimation de l'écart-type)

$$\lambda = 633 \text{ nm}, {}^{129}\text{I}_2$$

$$\text{P(69) 12-6}$$

Références  $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ composante } i(a_{13}), \text{ R(127) 11-5, } {}^{127}\text{I}_2, f = 473\,612\,214,8 \text{ MHz [1]} \\ \bullet f(k, \text{ P(54) 8-4, } {}^{129}\text{I}_2) - f(i, \text{ R(127) 11-5, } {}^{127}\text{I}_2) \\ = [95,90 \pm 0,04] \text{ MHz [24, 25]} \end{array} \right.$

Composante	$f(b_n) - f(k)$	$s$	Composante	$f(b_n) - f(k)$	$s$		
$b_1$	$b'''$	99,09	0,10	$b_{20}$	$q'$	508	4
$b_2$	$a'''$	116,05	0,10	$b_{22}$	$o'$	535	4
$b_3$	$z''$	132,02	0,10	$b_{23}$	$n'$	538	4
$b_4$	$s''$	234,55	0,10	$b_{24}$	$m'$	547	5
$b_5$	$r''$	257,0	0,5	$b_{25}$	$l'$	561	4
$b_6$	$q''$	264,9	0,5	$b_{26}$	$k'$	565	4
$b_7$	$p''$	288,06	0,10	$b_{27}$	$j'$	582	4
$b_8$	$k''$	338	1	$b_{28}$	$i'$	598	5
$b_9$	$i''_1$	359	1	$b_{29}$	$h'$	616	5
$b_{10}$	$i''_2$			$b_{30}$	$g'$	628	5
$b_{11}$	$f''$	373,77	0,20	$b_{31}$	$f'$	640	5
$b_{12}$	$d''$	385	4	$b_{32}$	$e'$	652	4
$b_{13}$	$c''$	393	4	$b_{33}$	$d'$	665	3
$b_{14}$	$b''$	401	4	$b_{34}$	$c'$	692	2
$b_{15}$	$a''$	407	4	$b_{35}$	$b'$	697	2
$b_{16}$	$z'$	411	4	$b_{36}$	$a'$	705	2
$b_{17}$	$y'$	417	4				

Réf. [26], [29]

TABLEAU 12

(unité : MHz;  $s$  : estimation de l'écart-type)

$$\lambda = 633 \text{ nm}, {}^{129}\text{I}_2$$

$$\text{P(60) 8-4}$$

Références  $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ composante } i(a_{13}), \text{ R(127) 11-5, } {}^{127}\text{I}_2, f = 473\,612\,214,8 \text{ MHz [1]} \\ \bullet f(k, \text{ P(54) 8-4, } {}^{129}\text{I}_2) - f(i, \text{ R(127) 11-5, } {}^{127}\text{I}_2) \\ = [95,90 \pm 0,04] \text{ MHz [24, 25]} \end{array} \right.$

Composante	$f(d_n) - f(k)$	$s$
$d_{23}$ A'	- 555	5
$d_{24}$ N	- 511	2
$d_{25}$ N		
$d_{26}$ M	- 499	2
$d_{27}$ M		
$d_{28}$ K	- 456	2

Réf. [26]

TABLEAU 13

(unité : MHz;  $s$  : estimation de l'écart-type)

$$\lambda = 633 \text{ nm}, {}^{129}\text{I}_2$$

$$\text{P(33) 6-3}$$

Références  $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ composante } i(a_{13}), \text{ R(127) 11-5, } {}^{127}\text{I}_2, f = 473\,612\,214,8 \text{ MHz [1]} \\ \bullet f(e_2) - f(i, \text{ R(127) 11-5, } {}^{127}\text{I}_2) = [988,29 \pm 0,2] \text{ MHz [31, 32, 33]} \end{array} \right.$

Composante	$f(e_n) - f(e_2)$	$s$	Composante	$f(e_n) - f(e_2)$	$s$
$e_1$ A	- 19,81	0,05	$e_9$ I	239	2
$e_2$ B	0	—	$e_{10}$ J	249	2
$e_3$ C	17,83	0,03	$e_{11}$ K	260	2
$e_4$ D	102,58	0,05	$e_{12}$ L	269	3
$e_5$ E	141	2	$e_{13}$ M	273	4
$e_6$ F	157	2	$e_{14}$ N	287	4
$e_7$ G	191	2	$e_{15}$ O	293	5
$e_8$ H	208	2	$e_{16}$ P	295	5
			$e_{17}$ Q	306	6

Réf. [26], [31], [32]

TABLEAU 14

(unité : MHz;  $s$  : estimation de l'écart-type)

$$\lambda = 633 \text{ nm}, \text{}^{127}\text{I}^{129}\text{I}$$

P(33) 6-3

Références  $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ composante } i(a_{13}), \text{ R}(127) \text{ 11-5, } \text{}^{127}\text{I}_2, f = 473\,612\,214,8 \text{ MHz [1]} \\ \bullet f(k, \text{ P}(54) \text{ 8-4, } \text{}^{129}\text{I}_2) - f(i, \text{ R}(127) \text{ 11-5, } \text{}^{127}\text{I}_2) \\ = [95,90 \pm 0,04] \text{ MHz [24, 25]} \end{array} \right.$

Composante	$f(m_n) - f(k)$	$s$	Composante	$f(m_n) - f(k)$	$s$		
$m_1$	$m'$	- 254	3	$m_{26}$	$u''$	212,85	0,10
$m_2$	$l'$	- 233,71	0,10	$m_{27}$	$t''$	219,46	0,10
$m_3$	$k'$	- 226,14	0,10	$m_{28}$	$r''$	256,95	0,20
$m_4$	$j'$	- 207	1,5	$m_{29}$	$q''$	264,88	0,20
$m_5$	$b'$	- 117,79	0,10	$m_{30}$	$o''$	299,25	0,10
$m_6$	$p$	- 87,83	0,15	$m_{31}$	$\dot{n}''$	312,46	0,10
$m_7$	$o$	- 78,2	0,5	$m_{32}$	$m''$	322,54	0,10
$m_8$	$n$	- 56 *	1	$m_{33}$	$l''$	333,14	0,10
$m_9$	$l$	- 17,52	0,10	$m_{34}$	$k_2''$	337,8	0,5
$m_{10}$	$j$	12,06	0,10	$m_{35}$	$k_1''$		
$m_{11}$	$i$	15,59	0,10	$m_{36}$	$j''$	345,07	0,10
$m_{12}$	$h$	33,16	0,10	$m_{37}$	$h''$	362,21	0,20
$m_{13}$	$g_2$	39,7	0,5	$m_{38}$	$g''$	369,79	0,15
$m_{14}$	$g_1$	41,3	0,5	$m_{39}$	$e''$	379	5
$m_{15}$	$f$	50,74	0,10	$m_{40}$	$d''$	385	4
$m_{16}$	$e$	54,06	0,10	$m_{41}$	$x'$	431	4
$m_{17}$	$d$	69,34	0,10	$m_{42}$	$w'$	445	4
$m_{18}$	$c$	75,08	0,10	$m_{43}$	$v'$	456	4
$m_{19}$	$b$	80,0	0,10	$m_{44}$	$u'$	478	4
$m_{20}$	$a$	95,01	0,10	$m_{45}$	$t'$	487	4
$m_{21}$	$y''$	160,75	0,05	$m_{46}$	$s'$	495	4
$m_{22}$	$x''$	199,52	0,10	$m_{47}$	$r'$	505	4
$m_{23}$	$w''$	205,08	0,15	$m_{48}$	$p'$	516	4
$m_{24}$	$v_2''$	207,9	0,5				
$m_{25}$	$v_1''$						

Réf. [21], [26], [29], [30]

\* aussi composantes  $a_{24}$  et  $a_{25}$  de P(54) 8-4,  $\text{}^{129}\text{I}_2$ .

## Bibliographie

- [1] Recommandation M 2 (CCDM, 7<sup>e</sup> session, 1982).
- [2] HACKEL, L. A., CASLETON, K. H., KUKOLICH, S. G. and EZEKIEL, S., *Phys. Rev. Lett.*, **35**, 1975, pp. 568-571.
- [3] CAMY, G., Thèse, Université Paris-Nord, 1979.
- [4] BORDÉ, C. J., CAMY, G., DECOMPS, B., DESCUBES, J.-P., *J. Phys.*, **42**, 1981, pp. 1393-1411.
- [5] SPIEWECK, F., GLÄSER, M., FOTH, H. J., European Conference on Atomic Physics, Apr. 6-10, 1981, Heidelberg. In : *Europhysics Conference Abstracts*, **5A**, Part I, pp. 325-326.
- [6] SPIEWECK, F., Communication privée.
- [7] FOTH, H. J., SPIEWECK, F., *Chem. Phys. Lett.*, **65**, 1979, pp. 347-352.
- [8] BAIRD, K. M., EVENSON, K. M., HANES, G. R., JENNINGS, D. A., PETERSEN, F. R., *Opt. Lett.*, **4**, 1979, pp. 263-264.
- [9] CÉREZ, P., BENNETT, S. J., *Applied Optics*, **18**, 1979, pp. 1079-1083.
- [10] KEGUNG DSCHAO, GLÄSER, M., HELMCKE, J., *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-29**, 1980, pp. 354-357.
- [11] BERTINETTO, F., CORDIALE, P., PICOTTO, G. B., CHARTIER, J.-M., FELDER, R., GLÄSER, M., *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-32**, 1983, pp. 72-76.  
et FELDER, R., BERTINETTO, F., Rapport BIPM-82/4.
- [12] CIDDOR, P. E., BROWN, N., *Opt. Comm.*, **34**, 1980, pp. 53-56.
- [13] GLÄSER, M., KEGUNG DSCHAO, FOTH, H. J., *Opt. Comm.*, **38**, 1981, pp. 119-123.
- [14] ROWLEY, W. R. C., WALLARD, A. J., *J. Phys. E*, **6**, 1973, pp. 647-651.
- [15] HANES, G. R., BAIRD, K. M. and De REMIGIS, J., *Applied Optics*, **12**, 1973, pp. 1600-1605.
- [16] CÉREZ, P., BRILLET, A. and HARTMANN, F., *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-23**, 1974, pp. 526-528.
- [17] BAYER-HELMS, F., CHARTIER, J.-M., HELMCKE, J. and WALLARD, A. J., *PTB-Bericht*, **Me-17**, 1977, pp. 139-146.
- [18] BERTINETTO, F., REBAGLIA, B. I., *Eurom eas*, **77**, *IEE*, **152**, 1977, pp. 38-39.
- [19] TANAKA, K., SAKURAI, T. and KUROSAWA, T., *Japan J. Appl. Phys.*, **16**, 1977, pp. 2071-2072.
- [20] BLABLA, J., SMYDKE, J., CHARTIER, J.-M., GLÄSER, M., *Metrologia*, **19**, 1983, pp. 73-75.  
et document CCDM/82-26.
- [21] Document CCDM/82-19a (Moyennes de mesures effectuées lors de comparaisons internationales entre le BIPM et le LHA, NPL, PTB, IMG C, INM, NBS, IMM, NIM, CSMU; 1974-1981).
- [22] MORINAGA, A. and TANAKA, K., *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 1978, pp. 114-116.
- [23] HANES, G. R., LAPIERRE, J., BUNKER, P. R. and SCHOTTON, K. C., *J. Mol. Spectrosc.* **39**, 1971, pp. 506-515.

- [24] ROWLEY, W. R. C., Document CCDDM/82-2 (mesures effectuées à  $t_{1291_2} = t_{1271_2} = 8^\circ\text{C}$ ).
  - [25] CHARTIER, J.-M., Rapport BIPM-82/10 (mesures effectuées à  $t_{1291_2} = t_{1271_2} = 8^\circ\text{C}$ ).
  - [26] GERLACH, R. W., Thèse, University Cleveland, 1975.
  - [27] KNOX, J. D. and YOH-HAN PAO, *Appl. Phys. Lett.*, **18**, 1971, pp. 360-362.
  - [28] TESIC, M. and YOH-HAN PAO, *J. Mol. Spectrosc.*, **57**, 1975, pp. 75-96.
  - [29] MAGYAR, J. A. and BROWN, N., *Metrologia*, **16**, 1980, pp. 63-68.
  - [30] *Procès-Verbaux CIPM*, **46**, 1978, p. 33.
  - [31] HELMCKE, J. and BAYER-HELMS, F., *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-23**, 1974, pp. 529-531 (mesures réduites à  $t_{1291_2} = t_{1271_2} = 2^\circ\text{C}$ ).
  - [32] A paraître dans les *Procès-Verbaux du CIPM* (mesures effectuées à  $t_{1291_2} = t_{1271_2} = 10^\circ\text{C}$ ).
  - [33] SCHWEITZER, Jr., W. G., KESSLER, Jr., E. G., DESLATTES, R. D., LAYER, H. P. and WHETSTONE, J. R., *Applied Optics*, **12**, 1973, pp. 2927-2938.
-



## *Notice for the reader of the English version*

*In order to make the reports of the various Comités Consultatifs more accessible to the many readers who are more familiar with the English language than with the French, the Comité International des Poids et Mesures has decided to publish an English version of these reports. The reader must however be aware that the official report is always the French one. The English version is published for convenience only. If any matter gives rise to controversy, or if an authoritative reference is needed, the French text must be used. This applies especially to the text of the recommendations submitted to the Comité International des Poids et Mesures.*

## **Avertissement au lecteur de la version anglaise**

Afin de rendre plus facile l'accès aux rapports des divers Comités Consultatifs pour de nombreux lecteurs qui sont plus familiers avec la langue anglaise qu'avec la langue française, le Comité International des Poids et Mesures a décidé de publier une version en anglais de ces rapports. Le lecteur doit cependant prendre garde au fait que le rapport officiel est toujours celui qui est rédigé en français. La version anglaise n'est publiée que pour faciliter la lecture. Si un point quelconque soulève une discussion, ou si une référence autorisée est nécessaire, c'est toujours le texte français qui doit être utilisé. Ceci s'applique particulièrement au texte des recommandations présentées au Comité International des Poids et Mesures.



---

## HISTORICAL NOTE

---

### Organs of the Convention du Mètre BIPM, CIPM, CGPM

The Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) was set up by the Convention du Mètre signed in Paris on 20 May 1875 by seventeen States during the final session of the Diplomatic Conference of the Metre. This Convention was amended in 1921.

BIPM has its headquarters near Paris, in the grounds (43 520 m<sup>2</sup>) of the Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) placed at its disposal by the French Government; its upkeep is financed jointly by the Member States of the Convention du Mètre.\*

The task of BIPM is to ensure worldwide unification of physical measurements; it is responsible for:

- establishing the fundamental standards and scales for measurement of the principal physical quantities and maintaining the international prototypes;
- carrying out comparisons of national and international standards;
- ensuring the co-ordination of corresponding measuring techniques;
- carrying out and co-ordinating determinations relating to the fundamental physical constants that are involved in the above-mentioned activities.

BIPM operates under the exclusive supervision of the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) which itself comes under the authority of the Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM).

The Conférence Générale consists of delegates from all the Member States of the Convention du Mètre and meets at present every four years. At each meeting it receives the Report of the Comité International on the work accomplished, and it is responsible for:

- discussing and instigating the arrangements required to ensure the propagation and improvement of the International System of Units (SI), which is the modern form of the metric system;
- confirming the results of new fundamental metrological determinations and the various scientific resolutions of international scope;
- adopting the important decisions concerning the organization and development of BIPM.

The Comité International consists of eighteen members each belonging to a different State; it meets at present every year. The officers of this committee issue an Annual Report on the administrative and financial position of BIPM to the Governments of the Member States of the Convention du Mètre.

The activities of BIPM, which in the beginning were limited to the measurements of length and mass and to metrological studies in relation to these quantities, have been extended to standards of measurement for electricity (1927), photometry (1937), and ionizing radiations (1960). To this end the original laboratories, built in 1876-1878, were enlarged in 1929 and two new buildings were constructed in 1963-1964 for the ionizing radiation laboratories. Some thirty physicists or technicians work in the laboratories of BIPM. They do metrological research, and also undertake measurement and certification of material standards of the above-mentioned quantities. BIPM's annual appropriation is of the order of 9 570 000 gold francs, approximately 17 400 000 French francs (in 1982).

---

\* As of 31 December 1982 forty-six States were members of this Convention: Argentina (Rep. of), Australia, Austria, Belgium, Brazil, Bulgaria, Cameroon, Canada, Chile, China (People's Rep. of), Czechoslovakia, Denmark, Dominican Republic, Egypt, Finland, France, German Democratic Rep., Germany (Federal Rep. of), Hungary, India, Indonesia, Iran, Ireland, Italy, Japan, Korea (Rep. of), Korea (Dem. People's Rep.), Mexico, Netherlands, Norway, Pakistan, Poland, Portugal, Romania, Spain, South Africa, Sweden, Switzerland, Thailand, Turkey, U.S.S.R., United Kingdom, U.S.A., Uruguay, Venezuela, Yugoslavia.

In view of the extension of the work entrusted to BIPM, CIPM has set up since 1927, under the name of Comités Consultatifs, bodies designed to provide it with information on matters that it refers to them for study and advice. These Comités Consultatifs, which may form temporary or permanent « Working Groups » to study special subjects, are responsible for co-ordinating the international work carried out in their respective fields and proposing recommendations concerning the amendments to be made to the definitions and values of units. In order to ensure worldwide uniformity in units of measurement, the Comité International accordingly acts directly or submits proposals for sanction by the Conférence Générale.

The Comités Consultatifs have common regulations (*Procès-Verbaux CIPM*, 1963, 31, 97). Each Comité Consultatif, the chairman of which is normally a member of CIPM, is composed of delegates from the major metrology laboratories and specialized institutes, a list of which is drawn up by CIPM, as well as individual members also appointed by CIPM and one representative of BIPM. These committees hold their meetings at irregular intervals; at present there are eight of them in existence :

1. The Comité Consultatif d'Électricité (CCE), set up in 1927.
2. The Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR), new name given in 1971 to the Comité Consultatif de Photométrie set up in 1933 (between 1930 and 1933 the preceding committee (CCE) dealt with matters concerning Photometry).
3. The Comité Consultatif de Thermométrie (CCT), set up in 1937.
4. The Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM), set up in 1952.
5. The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS), set up in 1956.
6. The Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants (CCEMRI), set up in 1958. In 1969 this committee established four sections: Section I (Measurement of X and  $\gamma$  rays, electrons); Section II (Measurement of radionuclides); Section III (Neutron measurements); Section IV ( $\alpha$ -energy standards). In 1975 this last section was dissolved and Section II made responsible for its field of activity.
7. The Comité Consultatif des Unités (CCU), set up in 1964 (this committee replaced the « Commission for the System of Units » set up by the CIPM in 1954).
8. The Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM), set up in 1980.

The proceedings of the Conférence Générale, the Comité International, the Comités Consultatifs, and the Bureau International are published under the auspices of the latter in the following series :

- *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* (this collection for private distribution brings together articles published in scientific and technical journals and books, as well as certain work published in the form of duplicated reports).

From time to time BIPM publishes a report on the development of the Metric System throughout the world, entitled *Les récents progrès du Système Métrique*.

The collection of the *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (22 volumes published between 1881 and 1966) ceased in 1966 by a decision of CIPM.

Since 1965 the international journal *Metrologia*, edited under the auspices of CIPM, has published articles on the more important work on scientific metrology carried out throughout the world, on the improvement in measuring methods and standards, on units, etc., as well as reports concerning the activities, decisions, and recommendations of the various bodies created under the Convention du Mètre.



AGENDA  
for the 7th Meeting

---

1. Definition of the metre
    - a) Review of the conclusions of the *ad hoc* CCDM/CCU Working Group of April 1981.
    - b) Approach to the «mise en pratique»: examination of the documents received, of the responses to the proposals and to the BIPM questionnaire and of the latest experimental results.
    - c) Formulation of a recommendation concerning a new definition of the metre.
    - d) Formulation of recommendations for the «mise en pratique» of the new definition.
  2. Future tasks of the BIPM in connection with the new definition.
  3. International measurement comparison for a line scale and international comparison of angle-measurement.
  4. Miscellaneous.
-

REPORT  
OF THE  
COMITÉ CONSULTATIF  
POUR LA DÉFINITION DU MÈTRE  
(7th Meeting — 1982)  
TO THE  
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES  
by W. R. C. ROWLEY, Rapporteur

---

The Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM) held its seventh meeting in the Pavillon de Breteuil in Sèvres, Thursday the 3rd and Friday the 4th of June 1982.

Present :

D. KIND, Vice-President of the CIPM, President of the CCDM.

The delegates of the member laboratories :

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung [ASMW],  
Berlin (K. SCHMIDT).

Bureau National de Métrologie, Paris : Institut National de  
Métrologie [INM] du Conservatoire National des Arts et Métiers  
[CNAM], (P. BOUCHARÉINE, P. CÉREZ du Laboratoire de l'Horloge  
Atomique, Orsay).

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield  
(P. E. CIDDOR).

Institut de Métrologie D. I. Mendéléév [IMM], Leningrad  
(A. N. TITOV).

Institut National de Métrologie [NIM], Beijing (LU SHAOZENG).

National Bureau of Standards [NBS], Washington and Boulder  
(K. G. KESSLER, D. JENNINGS)/Joint Institute for Laboratory  
Astrophysics [JILA], Boulder (J. L. HALL).

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

National Research Council [NRC], Ottawa (K. M. BAIRD).

National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Ibaraki  
(K. TANAKA).

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

The Director of the Bureau International des Poids et Mesures [BIPM],  
Sèvres (P. GIACOMO).

Invited :

Československý Metrologický Ústav [CSMU], Bratislava  
(J. BLABLA).

Istituto di Metrologia G. Colonnetti [IMGC], Turin (S. SARTORI).  
National Physical Research Laboratory [NPRL], Pretoria (J. BRINK).  
M. GARAVAGLIA, Director of Centro de Investigaciones Opticas,  
La Plata, Argentina.

Also present at the meeting : J. TERRIEN, Director Emeritus of the  
BIPM; T. J. QUINN, Deputy Director; P. CARRÉ, A. SAKUMA,  
J. HAMON, J.-M. CHARTIER, R. FELDER, M. GLÄSER (BIPM).

Sent regrets : B. EDLÉN (Lund), L. FRENKEL (Lynn, USA), K. SHIMODA  
(Tokyo), personally appointed members; International Astronomical  
Union (A. H. COOK).

The Chairman opened the session by welcoming the delegates, and  
expressing his optimism for an interesting and fruitful meeting.

Mr. Rowley was nominated Rapporteur, and asked to attend the  
meeting of the Comité Consultatif des Unités (CCU), which was to meet a  
few days later, in order to communicate the views of the CCDM in any  
discussion concerning its recommendations.

The agenda was approved.

### **Progress made since 1979 on measurements of the frequency, wavelength and reproducibility of stabilized lasers**

At its previous meeting in 1979, the CCDM had considered that  
although a redefinition of the metre would soon be necessary, insufficient  
progress had at that time been made in the development of the associated  
techniques that were required for its implementation. The preferred form of  
redefinition was one that would maintain unchanged the value for the  
speed of light  $c = 299\,792\,458$  m/s that had been recommended in 1973,  
and which had been endorsed by the 15th Conférence Générale des Poids et

Mesures in 1975. For its implementation in laboratory measurements, such a definition requires an accurate knowledge of the frequency  $f$  of one or more stabilized laser radiations, so that the corresponding wavelength  $\lambda$  may be determined from the relation  $\lambda = c/f$ .

Information concerning progress since 1979 was contributed by members prior to the meeting, in response to a questionnaire circulated by the BIPM (Doc. 82-3). A summary of these replies was prepared by the BIPM (Doc. 82-26).

### Frequency measurements

The majority of reported frequency measurements relate to the radiation of the He-Ne laser stabilized by saturated absorption of methane at the wavelength  $3.39 \mu\text{m}$ . One or more measurements had been completed at each of the laboratories INM, IMM, NPL and NRC; and other measurements were in progress at the IMGCC and PTB. There were thus six values of the frequency of this laser that had been determined, relative to the caesium standard, with relative uncertainties (estimated standard deviations) better than  $2 \times 10^{-10}$ .

Several laboratories had also completed, or were engaged in, measurements of frequencies of carbon dioxide laser radiations at about  $10 \mu\text{m}$ . Although these radiations are not themselves at present used in precision length measurement, they are important links in the chain of frequency measurements between the caesium standard and visible radiations.

Particularly significant measurements were reported by the NBS (Doc. 82-30). Values had been obtained for the frequencies of two visible stabilized-laser radiations (wavelengths  $576 \text{ nm}$  and  $633 \text{ nm}$ ), with relative uncertainties estimated at  $1.5 \times 10^{-10}$ . These values are the first visible frequency values, obtained through the exclusive use of frequency methods, that have uncertainties comparable with the reproducibility performance of the lasers.

### Wavelength measurements

Interferometric wavelength measurements, which are in fact wavelength ratio measurements, are a well-established method of interrelating visible wavelength standards. In the context of the proposed redefinition of the metre, they complement direct frequency measurements. A wavelength ratio is the inverse of a frequency ratio, so that wavelength measurements may be used to determine the frequency values of a number of visible radiations, by reference to a single visible or infrared radiation of directly measured frequency.

Recent wavelength measurements were reported by the BIPM, NIM, NPL, NRC, NRLM and PTB. The relative uncertainties (estimated standard deviations) ranged between  $1 \times 10^{-10}$  and  $3 \times 10^{-10}$  for

measurements between visible radiations; but for measurements relating visible to infrared radiations the uncertainties lay between  $2 \times 10^{-10}$  and  $2 \times 10^{-9}$ . The greater uncertainty for measurements involving infrared radiations arises from the difficulty of correcting for diffraction and other wavelength-dependent systematic effects. Studies of these effects were reported by the NPL, NRLM and PTB.

### Laser reproducibility

The reproducibility of stabilized lasers is determined particularly by direct comparisons of lasers from different laboratories using beat frequency methods. In recent years the BIPM has been the focus of most such comparisons, and has reported five comparisons at  $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$ , thirteen at  $\lambda = 633 \text{ nm}$  and one at  $\lambda = 612 \text{ nm}$ . In addition, there were separate comparisons between IMM, NBS and NPL at  $\lambda = 633 \text{ nm}$ .

As a result of these comparisons the BIPM suggested that the reproducibility of the  $3.39 \mu\text{m}$  methane-stabilized He-Ne laser was better than  $5 \text{ kHz}$  ( $6 \times 10^{-11}$ ), whilst other laboratories suggested estimates between the extremes of  $\pm 2 \times 10^{-11}$  (PTB) and  $\pm 2 \times 10^{-10}$  (IMM).

For the  $633 \text{ nm}$  stabilized He-Ne laser with an internal iodine cell, the operating conditions have a significant influence on the frequency and several laboratories presented reports on this subject. Contamination in the iodine cells and the unresolved hyperfine structure can also reduce the reproducibility. Several laboratories suggested that for appropriately specified operating conditions, the reproducibility of an internal cell laser was  $4 \times 10^{-11}$  (CSMU, IMGC, NPL),  $5 \times 10^{-11}$  (ASMW) or  $6 \times 10^{-11}$  (NRLM), although others suggested limits of  $1 \times 10^{-10}$  (PTB),  $2 \times 10^{-10}$  (NBS), or even  $2 \times 10^{-9}$  (IMM).

The other visible stabilized lasers have not been studied in such depth, but it was suggested that under closely specified conditions the  $612 \text{ nm}$  He-Ne laser could be reproducible to  $8 \times 10^{-11}$  (BIPM) or  $1 \times 10^{-10}$  (IMGC), and the external-cell  $515 \text{ nm}$   $\text{Ar}^+$  laser to  $1 \times 10^{-11}$  (PTB).

### Formulation of a new definition

In consideration of the progress that had been reported concerning measurements of the frequencies of visible and near-infrared laser radiations, their interrelation by means of interferometry, and their reproducibility, the Chairman asked delegates to express their opinions with regard to the proposed redefinition of the metre. The important questions to be answered were:

Had sufficient work now been done and were the accuracies now attained sufficient to realize the advantages of a redefinition?

Would it now be possible to agree on details for the specification of the means of practical realization for a new definition ?

Was it now the appropriate time to recommend that the metre be redefined ?

Each delegate in turn gave his answer to these questions. Without reservation each answered in the affirmative, and most expressed enthusiasm for a redefinition.

At its previous meeting in 1979, the CCDM had discussed and agreed upon the reasons why the present definition of the metre had been rendered unsatisfactory by the progress of technology. It was thus unnecessary to reconsider the matter. At the previous meeting the committee had also discussed alternative forms for a redefinition and had agreed that the only viable form would be one that maintained the value of the speed of light as a fixed constant, so that length would be determined either from the time of flight ( $l = c.t$ ) or from the wavelength of a monochromatic radiation of known frequency ( $\lambda = c/f$ ).

A provisional wording for a new definition had been formulated in 1979 in order that the CIPM and others might have time to consider whether a definition in that form would meet all requirements. Alternative forms of wording had been proposed by various organizations and individuals, and in April 1981 the CIPM organized a Working Group of CCU and CCDM delegates to discuss these alternatives. The conclusions reached by that Working Group (Doc. 81-19) were :

1. The various wordings which have been examined are scientifically satisfactory and will have equal consequences from the point of view of length measurements technology.
2. The different preferences expressed arise from a different weighting of considerations such as simplicity, generality and clarity, minimal disturbance to the SI or closeness to practical realization.
3. Finally, among the majority of the members of the Working Group, agreement was reached on a definition based on the path travelled by light in a given time interval.

The working group having thus endorsed the general form of wording proposed by the CCDM in 1979, it remained necessary only to agree on the precise wording for a new definition and of the associated formal considerations. A draft had been prepared as the basis for discussion by the BIPM (Doc. 82-4) which, delegates agreed, was so excellently considered and expressed that it was difficult to suggest improvements. Only a few minor changes to the *considerings* were proposed, and agreement was readily attained.

Some discussion took place with regard to the wording of the new

definition itself. Objections had been made (Doc. 82-10b, 82-15, 82-23b) to the introductory phrase of the English translation (Doc. 82-4(E)): « The metre is the distance travelled... ». One objection was that this might be interpreted as making the metre a unit of distance rather than of length. It was agreed, however, that the problem was only in the English text, and that an alternative translation (proposed by Mr. Baird) avoided the difficulty: « The metre is the length of the path travelled... ».

A more fundamental proposal was to change the wording to: « The metre is the unit of length; it is equal to... ». This wording would be similar to that in the definition of the kilogram. It was agreed, however, that whilst the CCDM had no objection to this proposed change, there was no strong feeling either for or against it. It was also noted that the subject was more properly a matter for consideration by the CCU, so that there was no need for the CCDM to make any change.

It was noted that the words proposed in 1979 «... les ondes électromagnétiques planes... », had been changed to «... la lumière... ». This had been suggested during discussions of the 1981 Working Group (Doc. 81-19), to avoid possible problems due to the rest mass of the photon or to the quantization of space. Alternatives such as «... plane luminous waves... » had been proposed (Doc. 81-18, 82-4), but it was agreed that the simpler term «... la lumière... » was sufficiently precise and was therefore to be preferred.

The question as to what qualifying terms (plane, continuous, infinite, etc.) might be necessary to describe the manner in which the radiation should be propagating, had been discussed during the 1979 meeting. It had at that time been decided to use only the term « plane ». If more terms were to be used, so as to be more specific, it might be assumed, erroneously, that those properties specified constituted a complete and sufficient list of qualifications. It had subsequently been pointed out that spherical waves emanating from a point source also propagate with the ideal speed, so that it would be better if such propagation were not excluded by the definition (Doc. 82-13b). It was thus agreed that even the term « plane » was unnecessary. In the absence of any such qualifying adjective, it would be clear to all that *the definition refers implicitly to light propagating in an ideal manner, free from perturbing effects.*

The word « vacuum » was discussed. It had been suggested that in English the term « free space » is often used to indicate both an ideal vacuum and freedom from all magnetic, electric, gravitational or other fields. It seems, however, that there is no equivalent term in French. There was also disagreement among the English-speaking delegates as to whether the term « free space » is still in current use. It was decided that the term might be ambiguous and that « vacuum » should be retained, as in the draft proposal.

In conclusion, the CCDM adopted Recommendation M1 (1982), (*see* p. M 94 and the Note of the BIPM, p. M 94).

## Specification of the means of practical realization

Although the proposed definition indicates specifically that the metre may be realized by determining the transit time of light, it is not intended to be interpreted as meaning that this is the only, or even the best, way of measuring length in absolute terms. It is, indeed, not immediately obvious how the definition may be implemented for precision laboratory measurements. It is thus necessary to specify methods by which the metre may be realized in practice, in accordance with the new definition.

A draft had been prepared by the BIPM (Doc. 82-4), following informal consultation with several member laboratories of the CCDM. This specified two general means of realization :

- 1) From a time of flight measurement, using the relation  $l = c.t$
- 2) By means of a wavelength, derived from a frequency by the relation  $\lambda = c/f$ .

In the latter case, radiations of known frequency and reproducibility would be recommended, from a given list, so that direct frequency measurements need not be made individually.

Some time was spent discussing and revising the manner in which reference was to be made to the list of recommended radiations. The difficulty was to find a form of wording that incorporated the following principles :

a) The list is intended to supplement and not to inhibit or take priority over individually-measured frequency values, which might be of higher accuracy.

b) The list, or any future revised version approved by the CCDM, should be the only such list to which authority is given.

c) Although primarily the aim has been to give a list of recommended frequencies of stabilized laser radiations for use in the method of realization (2) above, the alternative use of specified wavelength values should be permitted, particularly in connection with the discharge tube sources that form the present secondary wavelength standards ( $^{86}\text{Kr}$ ,  $^{198}\text{Hg}$ ,  $^{114}\text{Cd}$ ). (If frequency values were to be quoted for these sources, there would be rounding problems which might be taken to imply that the wavelength values recommended in 1962 *needed* to be altered.)

d) The numerical values and uncertainties in the list correspond to laser radiations stabilized by particular methods and within certain ranges of operating parameters. They may not apply to lasers stabilized by other methods and will not apply unless appropriate care is taken to avoid disturbing influences, particularly those that may occur in the associated electronic control systems. It is thus necessary to refer to accepted good practice in the stabilization and operation of the lasers.

e) The lengths and wavelengths determined from the given value of the speed of light will in many cases need to be corrected for non-ideal conditions of propagation, such as those caused by limited lateral dimensions (diffraction, waveguides), or relativistic effects. (The measurements should, for example, be confined within an inertial system of constant gravitational potential.)

In conclusion the CCDM adopted Recommendation M2 (1982), (*see* p. M 96 and Note of the BIPM, p. M 94).

### List of recommended radiations

Early in the session a working group was established to consider the new results that had been presented, in order to update the draft list of recommended radiations (Doc. 82-4). The working group comprised delegates from the laboratories BIPM, NBS/JILA, NPL, NRC, PTB and IMM. At the suggestion of Mr. Kessler, it was agreed that the working group should continue after the meeting, by correspondence through the BIPM, so as to have the list as up to date as possible for the meetings of the CIPM in 1982 and 1983 (before the *Conférence Générale*). The final revision would probably have to take place early in June 1983.

Although the working group met several times, they were unable to produce a complete text before the end of the session. They were, however, able to produce a partial text and list of numerical values, including some of the uncertainties, together with specifications for the operating parameters of two of the laser systems. This draft document was discussed by the full committee. General assent was given to the format, although several suggestions were made to improve the wording, and these will be taken into account by the working group in producing subsequent drafts. The main features of the list were :

a) Five stabilized laser radiations were listed, (frequencies 88, 473, 489, 520, and 582 THz).

b) For each laser system a brief list of operating conditions was given, in order to assure reproducibility within the quoted uncertainties. (Some references to literature illustrating accepted good practice were also to be given.)

c) The uncertainties were quoted at a confidence level corresponding to three times the estimated standard error of the mean. These uncertainties (in relative terms) were  $2 \times 10^{-10}$  for the infrared radiation, and ranged from  $7 \times 10^{-10}$  to  $1.5 \times 10^{-9}$  for the four visible radiations.

d) The present krypton-86 standard radiation was quoted with a wavelength value only, retaining the relative uncertainty of  $4 \times 10^{-9}$  which was agreed upon in 1973.

e) The secondary-standard discharge-tube sources recommended in 1962 were specified as retaining their former wavelength and uncertainty values.

In document 82-6, Mr. Giacomo had indicated a problem with regard to the spectroscopic notation of the molecular transitions used for laser stabilization. It is current practice to use a simple notation, which serves for identification by reference to a published pattern of the spectrum. Unfortunately there are two alternative forms of simple notation that have been used in different cases, and there was suggestion that a particular convention be considered for use with any new radiations (Doc. 82-32). A formal notation specifying quantum numbers is not easy to establish as some quantum numbers lose their validity under particular circumstances, and considerable computation may be required to determine the precise interactions (Doc. 82-35). It was agreed that delegates should refer the matter to molecular spectroscopists, and to try to reach agreement in time for the final draft of the list of recommended radiations.

The list of recommended radiations has a note indicating that alternative transitions to those listed may be used if their frequency difference is known with sufficient accuracy. This is intended to permit the use of different hyperfine components or different isotopes. A list of such frequency intervals had been given as an Appendix to the report of the 5th meeting in 1973. A provisional revised list was presented by the BIPM (Doc. 82-29), and Mr. Giacomo enquired whether delegates found such a list useful, and whether it should be published. It was agreed that the list was indeed very valuable and should be revised and published. Delegates were requested to communicate recently-determined values to the BIPM so that they might be included (*see* p. M 140).

### **Future tasks for the BIPM and CCDM**

So as to have up-to-date information in the list of recommended radiations, to be associated with the redefinition recommendation when it is presented to the CGPM, members of the CCDM were urged to communicate results of frequency and wavelength measurements to the BIPM before the end of May 1983. (It would be particularly advantageous to have additional visible frequency measurements.) The CCDM will then be able to give its approval to a revised list by correspondence.

It is not anticipated that significant problems will be encountered in the implementation of the new definition, so that it is unlikely that the CCDM will need to meet again to review the situation until 1985 or 1986. In the meantime, however, it is expected that even greater emphasis will be placed on lasers. In particular, the BIPM is likely to be asked to carry out many laser comparisons. This work will be in addition to the measurement of

mechanical standards (scales, end gauges and geodetic tapes) that will continue to be the reference standards for many metrology laboratories.

The extent of the necessary BIPM involvement in laser work, however, is not yet clear. A primary duty will be to maintain uniformity of the length unit by maintaining stabilized lasers of different types and by carrying out international comparisons with them. A potential problem is the number of laser types, so that it may not be possible to maintain samples of every type. Factors affecting laser reproducibility have often been shown up through international comparisons. The BIPM is thus well placed to carry out research on such factors. It may be advisable for the BIPM to become involved also in frequency-chain measurements, or in the use of similar frequency-mixing techniques for the comparison of visible lasers; but this is not yet clear. Unlike some other fields, laser work is expanding and much new development can be anticipated.

It is clear, however, that there is serious shortage of space for the BIPM laser work. The present facilities are not really adequate for international comparisons, and do not offer enough space for reference lasers to be maintained undisturbed between comparisons, so that any research activity on reproducibility is severely hampered. In recognition of this, the CCDM adopted Recommendation M3 (1982), (*see* p. M 99).

### **International comparisons of scale and angle standards**

The international comparison of a 1-m line scale, which was begun in 1976, is near completion. Only CSIRO (Australia) and OFMET (Switzerland) have to complete their measurements. A progress report was presented by the BIPM (Doc. 82-18), which included a comparative diagram of the results for the principal interval. These results are somewhat disappointing, with disagreements greater than three times their standard deviation. The problem probably lies to a great extent in the quality of the marking on the scale and the flatness, etc. of the surface. The BIPM has excellent facilities for making measurements on scales and reported some tests on a short scale having graduations of different widths (Doc. 82-19a). The tests showed clearly that, for the BIPM apparatus, the narrowest lines gave the most reproducible results.

A report on the progress of the angle standard comparison, initiated in 1979, was presented by the NRLM (Doc. 82-42). There are now eleven laboratories taking part, and so far four have completed their measurements. One of the two polygons suffered slight damage whilst at NPL, such that 20 % of one face must now be covered. A revised timetable for the remainder of the comparison is to be compiled by the pilot laboratory, NRLM.

### Other matters

Some developments in techniques of interest to members of the CCDM were discussed. Mr. Hall outlined a method for improving the resolution of wavelength comparisons that use a moving-carriage interferometer, by taking many readings during a traverse, such that a resolution of one part in  $10^{11}$  could be obtained in 1 s. He also drew attention to a form of stabilized laser, based on an inexpensive commercial laser and the Zeeman effect, which afforded a reproducibility of about  $2 \times 10^{-9}$ . Mr. Hall also mentioned a modulation technique that improved the signal-to-noise ratio for laser stabilization. Mr. Helmcke discussed some work on methods for reducing the Doppler shift in atomic beam studies, by selecting a small velocity group, which enabled the second-order Doppler shift to be calculated.

Mr. Baird asked if there was a possibility that the BIPM might organize technical conferences on topics of interest to the CCDM. Many delegates expressed support but considered that a workshop, rather than a conference, would be more appropriate. Mr. Giacomo, however, doubted that the BIPM had the resources to organize conferences in addition to existing commitments. He indicated, nevertheless, that the BIPM would be happy to participate in a workshop organized by a member laboratory, and agreed that such a workshop could appropriately be held in conjunction with some established international conference.

\*  
\* \*

In closing the session, the Chairman remarked on the importance of the decision that had been made and on the simplicity and clarity of the recommended new definition. He thanked the participants for their discussions, the working group for their industrious efforts, and the BIPM for their excellent preparations. Mr. Kessler, on behalf of the participants, also thanked the BIPM for their hospitality and congratulated the Chairman on his conduct of the 7th Meeting of the CCDM.

25 June 1982

**Recommendations**  
**of the Comité Consultatif pour la Définition du Mètre**  
**submitted**  
**to the Comité International des Poids et Mesures**

*Note of the BIPM :*

During its 8th meeting held on the 8th and 9th of June 1982, the Comité Consultatif des Unités (CCU) examined the Recommendations adopted by the CCDM. It made two minor modifications in the wording of the *considerings* of the Recommendation M 1 and in the wording of the list of the recommended radiations; but it proposed more important amendments to the Recommendation M 2.

Later, Mr. Kind convoked a working group on the occasion of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 1982) (June 28-July 1) in Boulder. This working group concluded that the amendments proposed by the CCU improve the form of the Recommendations without altering their meaning. It made two further amendments to the wording of the Recommendation M 2 and suggested adding an introductory paragraph at the beginning of the « List of recommended radiations, 1982 ».

These modifications and amendments have been accepted by correspondence by the members of the CCDM and the CCU.

In the course of its 71st meeting, in October 1982, the CIPM made minor modifications in the wording of the Recommendations M 1 and M 2, which will be submitted as draft resolutions A and B to the 17th Conférence Générale des Poids et Mesures (October 1983).

The wording of the following Recommendations is the final wording adopted by the CIPM.

Source data used to establish the list of recommended radiations are given in Appendix M 4 (*see* p. M 129).

---

On a new definition of the metre

RECOMMENDATION M 1 (1982)

The Comité Consultatif pour la Définition du Mètre,  
*recalling* its Recommendation M 2 (1979) and  
*considering* :

1) that the present definition does not allow a sufficiently precise realization of the metre for all requirements;

2) that progress made in the stabilization of lasers allows radiations to be obtained that are more reproducible and easier to use than the standard radiation emitted by a krypton 86 lamp;

3) that progress made in the measurement of the frequency and wavelength of these radiations has resulted in concordant determinations of the speed of light whose accuracy is limited principally by the realization of the present definition of the metre;

4) that wavelengths determined from frequency measurements and a given value for the speed of light have a reproducibility superior to that which can be obtained by comparison with the wavelength of the standard radiation of krypton 86;

5) that there is an advantage, notably for astronomy and geodesy, in maintaining unchanged the value of the speed of light recommended in 1975 by the 15th Conférence Générale des Poids et Mesures in its Resolution 2 ( $c = 299\,792\,458$  m/s);

6) that a new definition of the metre has been envisaged in various forms all of which have the effect of giving the speed of light an exact value, equal to the recommended value, and that this introduces no appreciable discontinuity into the unit of length, taking into account the relative uncertainty of  $\pm 4 \times 10^{-9}$  of the best realizations of the present definition of the metre;

7) that these various forms, making reference either to the path travelled by light in a specified time interval or to the wavelength of a radiation of measured or specified frequency, have been the object of consultations and deep discussions, have been recognized as being equivalent and that a consensus has emerged in favour of the first form;

8) that the Comité Consultatif pour la Définition du Mètre is now in a position to give instructions for the practical realization of such a definition, instructions which could include the use of the orange radiation of krypton-86 used as standard up to now, and which may in due course be extended or revised;

*recommends*

— that the metre be defined as follows :

« The metre is the length of the path travelled by light in vacuum during a time interval of  $1/299\,792\,458$  of a second »;

— that the definition of the metre in force since 1960, based upon the transition between the levels  $2p_{10}$  and  $5d_5$  of the atom of krypton-86 be abrogated.

---

Practical realization of the definition of the metre (on the assumption that the CGPM adopts a definition which conforms to Recommendation M 1 (1982))

RECOMMENDATION M 2 (1982)

The Comité Consultatif pour la Définition du Mètre

*recommends*

— that the metre be realized by one of the following methods :

*a*) by means of the length  $l$  of the path travelled in vacuum by a plane electromagnetic wave in a time  $t$ ; this length is obtained from the measured time  $t$ , using the relation  $l = c \cdot t$  and the value of the speed of light in vacuum  $c = 299\,792\,458$  m/s;

*b*) by means of the wavelength in vacuum  $\lambda$  of a plane electromagnetic wave of frequency  $f$ ; this wavelength is obtained from the measured frequency  $f$ , using the relation  $\lambda = c/f$  and the value of the speed of light in vacuum  $c = 299\,792\,458$  m/s;

*c*) by means of one of the radiations from the list below, whose stated wavelength in vacuum, or whose stated frequency, can be used with the uncertainty shown, provided that the given specifications and accepted good practice are followed;

— and that in all cases any necessary corrections be applied to take account of actual conditions such as diffraction, gravitation, or imperfection in the vacuum.

N.B. The following numerical values must be regarded as provisional as far as the last digit is concerned; the list will only become official after approval and publication by the CIPM.

(See Appendix M 4: Source data for the list of recommended radiations, 1982 and Annotated bibliography.

See also Appendix M 5: Frequency intervals between hyperfine components of absorption lines of iodine.)

LIST OF RECOMMENDED RADIATIONS, 1982

In this list, the values of the frequency  $f$  and of the wavelength  $\lambda$  should be related exactly by the relation  $\lambda f = c$ , with  $c = 299\,792\,458$  m/s but the values of  $\lambda$  are rounded.

1. — *Radiations of lasers stabilized by saturated absorption* \*

1.1. — Absorbing molecule  $\text{CH}_4$ , transition  $\nu_3$ , P(7), component  $F_2^{(2)}$ .

$$\begin{aligned} \text{The values } f &= 88\,376\,181\,608 \text{ kHz} \\ \lambda &= 3\,392\,231\,397.0 \text{ fm} \end{aligned}$$

with an estimated overall relative uncertainty of  $\pm 1.3 \times 10^{-10}$  [which results from an estimated relative standard deviation of  $0.44 \times 10^{-10}$ ] apply to the radiation of a He-Ne laser stabilized with a cell of methane, within or external to the laser, subject to the conditions :

- methane pressure  $\leq 3 \text{ Pa}$
- mean one-way axial intracavity surface power density \*\*  $\leq 10^4 \text{ W m}^{-2}$
- radius of wavefront curvature  $\geq 1 \text{ m}$
- inequality of power between counter-propagating waves  $\leq 5 \%$ .

1.2. — Absorbing molecule  $^{127}\text{I}_2$ , transition 17-1, P(62), component o.

$$\begin{aligned} \text{The values } f &= 520\,206\,808.51 \text{ MHz} \\ \lambda &= 576\,294\,760.27 \text{ fm} \end{aligned}$$

with an estimated \*\*\* overall relative uncertainty of  $\pm 6 \times 10^{-10}$  [which results from an estimated relative standard deviation of  $2 \times 10^{-10}$ ] apply to the radiation of a dye laser (or frequency-doubled He-Ne laser) stabilized with a cell of iodine, within or external to the laser, having a cold-finger temperature of  $6^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ .

1.3. — Absorbing molecule  $^{127}\text{I}_2$ , transition 11-5, R(127), component i.

$$\begin{aligned} \text{The values } f &= 473\,612\,214.8 \text{ MHz} \\ \lambda &= 632\,991\,398.1 \text{ fm} \end{aligned}$$

with an estimated overall relative uncertainty of  $\pm 1 \times 10^{-9}$  [which results from an estimated relative standard deviation of  $3.4 \times 10^{-10}$ ] apply to the radiation of a stabilized He-Ne laser containing an iodine cell, subject to the conditions :

- cell-wall temperature between  $16^\circ\text{C}$  and  $50^\circ\text{C}$  with a cold-finger temperature of  $15^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$
- one-way intracavity beam power \*\*  $20 \text{ mW} \pm 5 \text{ mW}$
- frequency modulation amplitude, peak to peak,  $6 \text{ MHz} \pm 1 \text{ MHz}$ .

1.4. — Absorbing molecule  $^{127}\text{I}_2$ , transition 9-2, R(47), component o.

$$\begin{aligned} \text{The values } f &= 489\,880\,355.1 \text{ MHz} \\ \lambda &= 611\,970\,769.8 \text{ fm} \end{aligned}$$

with an estimated overall relative uncertainty of  $\pm 1.1 \times 10^{-9}$  [which results from an estimated relative standard deviation of  $3.7 \times 10^{-10}$ ] apply to the radiation of a He-Ne laser stabilized with a cell of iodine, within or external to the laser, having a cold-finger temperature of  $-5^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ .

1.5. — Absorbing molecule  $^{127}\text{I}_2$ , transition 43-0, P(13), component  $a_3$  (sometimes called component s).

$$\begin{aligned} \text{The values } f &= 582\,490\,603.6 \text{ MHz} \\ \lambda &= 514\,673\,466.2 \text{ fm} \end{aligned}$$

with an estimated overall relative uncertainty of  $\pm 1.3 \times 10^{-9}$  [which results from an estimated relative standard deviation of  $4.3 \times 10^{-10}$ ] apply to the radiation of an  $\text{Ar}^+$  laser, stabilized with a cell of iodine, within or external to the laser, having a cold-finger temperature of  $-5^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ .

#### Notes

\* Each of these radiations can be replaced, without degrading the accuracy, by a radiation corresponding to another component of the same transition or by another radiation, when the frequency difference is known with sufficient accuracy. Details of methods of stabilization are described in numerous scientific and technical publications. References to appropriate articles, illustrating accepted good practice for a particular radiation, may be obtained by application to a member laboratory of the CCDM, or to the BIPM.

\*\* The one-way intracavity beam power is obtained by dividing the output power by the transmittance of the output mirror.

\*\*\* This uncertainty, and the frequency and wavelength values, are based on the weighted mean of only two determinations. The more precise of the two, however, was a measurement dependent only on frequency mixing and multiplication techniques relative to the radiation in 1.1 above.

## 2. — Radiations of spectral lamps

2.1. — Radiation corresponding to the transition between the levels  $2p_{10}$  and  $5d_5$  of the atom of  $^{86}\text{Kr}$ .

$$\text{The value } \lambda = 605\,780\,210.2 \text{ fm}$$

with an estimated overall relative uncertainty of  $\pm 4 \times 10^{-9}$  [which results from an estimated relative standard deviation of  $1.3 \times 10^{-9}$ ] applies to the radiation emitted by a lamp operated under the conditions recommended by the CIPM (*Procès-Verbaux CIPM*, 49th session, 1960, pp. 71-72 and *Comptes Rendus 11th CGPM*, 1960, p. 85).

2.2. — Radiations of the atoms  $^{86}\text{Kr}$ ,  $^{198}\text{Hg}$  and  $^{114}\text{Cd}$  recommended by the CIPM in 1963 (*Comité Consultatif pour la Définition du Mètre*, 3rd session, 1962, pp. 18-19 and *Procès-Verbaux CIPM*, 52nd session, 1963, pp. 26-27), with the indicated values for the wavelengths and the corresponding uncertainties.

Work on lasers at the BIPM

RECOMMENDATION M 3 (1982)

The Comité Consultatif pour la Définition du Mètre,

*considering*

— that the field of laser length metrology is growing rapidly in importance;

— that the proposed new definition of the metre will increase demands for calibration and intercomparison of lasers at the BIPM;

— that in order to be in a position to carry out such work, adequate laboratory accommodation together with sufficient high-quality staff are required;

— that the laser work at the BIPM is carried out in addition to traditional length metrology;

— that the laboratory space available for laser work is already inadequate for present requirements;

— that a proposal exists for the construction of a new laser building at the BIPM;

*recommends*

— that approval be given as soon as possible for a new building for laser work at the BIPM;

— that appropriate means be taken to overcome the shortage of manpower in the BIPM laser section.

---

APPENDIX M 1

---

**Working documents submitted to the CCDM at its 7th Meeting**  
(*see* the list of documents on page M 19)

---

## APPENDIX M 2

---

### Preliminary questionnaire

---

- A — Questionnaire sent by the BIPM to the members of the CCDM on February 26, 1982.
- B — Summary of the replies to this questionnaire.
- 

### M 2A

### Questionnaire on the results obtained since 1979

---

#### 1. Frequency measurements

- 1.1. — Have you made absolute frequency measurements of laser radiations in the visible or near infrared ?
- 1.2. — Have you measured the ratio of frequencies of laser radiations ?
- 1.3. — Have you any results concerning comparisons of radiations emitted by lasers fabricated in different laboratories (except comparisons with the BIPM) ?
- 1.4. — With the aim of updating and completing the tables published in 1973 (*CCDM 1973*, pp. M 25, M 26) :
- 1.4.1. — Have you made, with He-Ne lasers ( $\lambda = 612$  nm and  $\lambda = 633$  nm), measurements of frequency intervals

between hyperfine components of iodine 127, iodine 129 and also between the reference components of the following three groups:  $^{129}\text{I}_2(^{22}\text{Ne})$ ,  $^{129}\text{I}_2(^{20}\text{Ne})$ ,  $^{127}\text{I}_2(^{20}\text{Ne})$ ?

- 1.4.2. — Same question for argon lasers and, if relevant, for other lasers.

## 2. Wavelength measurements

- 2.1. — Have you made interferometric comparisons of wavelengths of laser radiations?
- 2.2. — Have you investigated correction terms such as those due to the refractive index of the air and to diffraction?

## 3. Reproducibility

What, in your opinion, are the most probable values for the uncertainties in the recommended wavelengths or frequencies and what are the conditions of realization to be specified in order not to exceed these uncertainties?

- 3.1. — for methane-stabilized lasers,  $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$ ;
- 3.2. — for iodine-stabilized lasers,  $\lambda = 515 \text{ nm}$ ,  $612 \text{ nm}$ ,  $633 \text{ nm}$ ;
- 3.3. — for other lasers, if relevant.

## 4. Line, end and angle standards

Have you any progress to report in the fabrication or in the measurement of line standards, end standards or angle standards?

---

M 2B

## Abstract of the replies to the questionnaire

This abstract is extracted from the following documents :

- CCDM/82- 5b : CSIRO (Australia)  
/82- 9b : PTB (Federal Republic of Germany)  
/82-10a : NPL (United Kingdom)  
/82-11 : NRC (Canada)

- /82-12a : NIM (People's Republic of China)
- /82-13a : INM (France)
- /82-14a : NBS (United States of America)
- /82-16 : ASMW (German Democratic Republic)
- /82-17b : IMG C (Italy)
- /82-19a : BIPM
- /82-20 : NRLM (Japan)
- /82-22b : CSMU (Czechoslovakia)
- /82-24a : IMM (U.S.S.R.)

and from the documents submitted during the meeting :

- CCDM/82-30 : NBS
- /82-43 : JILA (United States of America)

## 1. Frequency measurements

1.1. — *Have you made absolute frequency measurements of laser radiations in the visible or the near infrared?*

- PTB : Measurements in progress of the frequency of the methane-stabilized laser.
- NPL : The frequency of the methane-stabilized laser at  $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$  has been measured :  $(88\,376\,181\,616 \pm 3) \text{ kHz}$  [KNIGHT, D. J. E., EDWARDS, G. J., PEARCE, P. R. and CROSS, N. R., Measurement of the frequency of the  $3.39 \mu\text{m}$  methane-stabilized laser to  $\pm 3$  parts in  $10^{11}$ , *IEEE Trans. Inst. Meas.*, **IM-29**, No. 4, 1980, pp. 257-264].
- NRC : WHITFORD, B. G., Measurement of the Absolute Frequencies of  $\text{CO}_2$  Laser Transitions, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-29**, 1960, pp. 168-176.  
BAIRD, K. M., EVENSON, K. M., HANES, G. R., JENNINGS, D. A. and PETERSEN, F. R., *Optics Letters* **4**, 1979, pp. 263-4.  
WHITFORD, B. G., Absolute Frequencies of  $\text{CO}_2$  Laser Transitions by Multiplication of  $\text{CO}_2$  Laser Difference Frequencies, *Optics Comm.*, **31**, 1979, pp. 363-366.  
BAIRD, K. M., SMITH, D. S. and WHITFORD, B. G., Confirmation of the Currently Accepted Value 299 792 458 Metres per Second for the Speed of Light, *Optics Comm.*, **31**, 1979, pp. 367-368.
- NIM : Laser systems have been developed : iodine-stabilized He-Ne lasers ( $\lambda = 633$  and  $612 \text{ nm}$ ), methane-stabilized He-Ne lasers ( $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$ ), stabilized  $\text{CO}_2$  lasers and the optically-pumped methyl alcohol FIR laser ( $\lambda = 70.5 \mu\text{m}$ ).

INM : The frequency of the methane-stabilized laser at  $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$  has been measured :  $(88\ 376\ 181\ 612 \pm 11)$  kHz, and in 1980, the frequency of about 20 saturated absorption lines of  $^{192}\text{OsO}_4$  and  $\text{SF}_6$  (CLAIRON, A., van LERBERGHE, A., BRÉANT, Ch., SALOMON, Ch., CAMY, G. and BORDÉ, Ch. J., Towards a New Absolute Frequency Reference Grid in the 28 THz Range, *Opt. Comm.*, **35**, 3, 1980, pp. 368-372).

IMGC : A program has been started for the measurement of the frequency of a methane-stabilized laser.

NRLM : A system for measuring the absolute frequency of the  $\text{CO}_2$  laser is being prepared; it consists of phase-locked klystrons, an optically-pumped alcohol laser ( $251 \mu\text{m}$ , 10 mW), a water vapour laser ( $28 \mu\text{m}$ , 50 to 200 mW) and a  $\text{CO}_2$  laser ( $9.3 \mu\text{m}$ , 0.5 W); all of these are linked by tungsten-nickel point-contact diodes.

IMM : Absolute measurements of the frequency of the He-Ne laser stabilized on the component  $F_2^{(2)}$  of methane :

$$f = (88\ 376\ 181\ 603.4 \pm 1.4) \text{ kHz}$$

[DOMNINE, Y. S., KOCHELYAEVSKY, N. B., TATARENKOV, V. M. and CHOUYATSKY, P. S., *JETP Letters*, **34**, pub. 4, 1981, pp. 175-178].

NBS : Taking as reference the value  $(88\ 376\ 181\ 609 \pm 9)$  kHz as the frequency of the methane line, the following frequencies have been measured :

$$^{127}\text{I}_2 \text{ component i} \quad \left\{ \begin{array}{l} f = 473\ 612\ 214\ 789 \text{ Hz} \\ \lambda = 632.991\ 398\ 107 \text{ nm} \end{array} \right.$$

of the line 11-5 R(127)

$$^{127}\text{I}_2 \text{ component g} \quad \left\{ \begin{array}{l} f = 473\ 612\ 340\ 492 \text{ kHz} \\ \lambda = 632.991\ 230\ 099 \text{ nm} \end{array} \right.$$

of the line 11-5 R(127)

$$^{127}\text{I}_2 \text{ component o} \quad \left\{ \begin{array}{l} f = 520\ 206\ 808\ 547 \text{ kHz} \\ \lambda = 576.294\ 760\ 227 \text{ nm} \end{array} \right.$$

of the line 17-1 P(62)

$$^{20}\text{Ne Lamb-dip } 1.15 \mu\text{m} \quad \left\{ \begin{array}{l} f = (260\ 103\ 249\ 260 \pm 100) \text{ kHz} \\ \lambda = 1\ 152.590\ 207\ 36 \text{ nm} \end{array} \right.$$

$$\text{R}_1(26) \text{ line of } ^{13}\text{C } ^{18}\text{O}_2 \quad \left\{ \begin{array}{l} f = 31\ 287\ 036\ 411.7 \text{ kHz} \\ \lambda = 9\ 582.002\ 400\ 45 \text{ nm} \end{array} \right.$$

$$\text{P}_1(50) \text{ line of } ^{13}\text{C } ^{16}\text{O}_2 \quad \left\{ \begin{array}{l} f = 26\ 035\ 339\ 977.6 \text{ kHz} \\ \lambda = 11\ 514.827\ 855\ 44 \text{ nm} \end{array} \right.$$

$$\text{R}_1(30) \text{ line of } ^{12}\text{C } ^{16}\text{O}_2 \quad \left\{ \begin{array}{l} f = 29\ 442\ 483\ 319.7 \text{ kHz} \\ \lambda = 10\ 182.308\ 833\ 96 \text{ nm} \end{array} \right.$$

All uncertainties are estimated to be  $1.5 \times 10^{-10}$  except that for the  $1.15 \mu\text{m}$  Lamb-dip line. The quoted  $\text{CO}_2$  frequencies are not corrected to their line centers and the uncertainty of  $1.5 \times 10^{-10}$  in the  $\text{CO}_2$  frequencies represents the frequency error for the specific  $\text{CO}_2$  lasers used as transfer oscillators. All errors quoted are one sigma.

JILA : The recent joint NBS/JILA measurement of the frequency of the i-component of  $^{127}\text{I}_2$  at  $633 \text{ nm}$  gave the value  $(473\,612\,214\,789 \pm 70) \text{ kHz}$  for a laser of the NBS design operated at  $18^\circ\text{C}$  side arm temperature,  $7 \text{ MHz}$  peak-to-peak modulation and  $50 \mu\text{W}$  output power. The measurement is referred to a  $\text{CH}_4$ -stabilized laser which operated  $(2.7 \pm 0.2) \text{ kHz}$  blue of the central  $\text{CH}_4$  hyperfine component; a value of  $(88\,376\,181\,609 \pm 9) \text{ kHz}$  was assumed for this laser to provide connection to Cs. By far the major uncertainty arises in the reproducibility problem at  $633 \text{ nm}$ .

1.2. — *Have you measured the ratio of frequencies of laser radiations?*

PTB : See 1.1.

NRC : SIEMSEN, K. J., The Sequence Bands of the Carbon -13 Isotope  $\text{CO}_2$  Laser, *Optics Comm.*, **34**, 1980, pp. 447-450.

SIEMSEN, K. J., Sequence Bands of the Isotope  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$  Laser, *Optics Letters*, **6**, 1981, pp. 114-116.

PETERSEN, F. R., WELLS, J. S., MAKI, A. G. and SIEMSEN, K. J., Heterodyne Frequency Measurements of  $^{13}\text{CO}_2$  Laser Hot Band Transitions, *Appl. Opt.*, **20**, 1981, pp. 3635-3640.

NBS : a) Measurement of the frequency of the  $^{127}\text{I}_2$  line at  $0.576 \mu\text{m}$  [17-1, P(62) o component] relative to the frequency of the  $\text{P}_1(50)$  line in  $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ :  $26\,035\,339.973 \text{ MHz} \pm 1 \times 10^{-9}$ . The value for the frequency of  $^{127}\text{I}_2$  line was  $520\,206\,808.307 \text{ MHz} \pm 1 \times 10^{-9}$ . The uncertainty is determined by the uncertainty in the  $\text{CO}_2$  line and might reach about  $4 \times 10^{-11}$ .

b) Measurement of the frequency of a  $^{20}\text{Ne}$  laser Lamb-dip stabilized at  $1.15 \mu\text{m}$ , relative to the  $0.576 \mu\text{m}$  line reported in a); result:  $260\,103\,249.20 \text{ MHz} \pm 1 \times 10^{-9}$ . The reproducibility of this laser is  $5 \times 10^{-10}$ . A preprint describing this work has been presented at the CPEM meeting in June 1982.

c) Measurement of terahertz frequency differences in the visible utilizing metal-insulator-metal diodes has been demonstrated (to be published in *Optics Letters*).

IMGC : See 1.1.

NRLM : Measurement of the frequency difference between a methane-stabilized laser and the third harmonic of the 10.2  $\mu\text{m}$  R(30) transition of a  $\text{CO}_2$  laser. The difference is  $(48\,731.796 \pm 0.281)$  MHz.

1.3. — *Have you results concerning comparison of radiations emitted by lasers fabricated in different laboratories ?*

NPL : A comparison of 633 nm, iodine-127 stabilized, He-Ne lasers has been made with the NBS and the results have been published [LAYER, H. P., ROWLEY, W. R. C. and MARX, B. R., *Optics Letters*, **6**, 1981, pp. 188-190]. The conclusion was that the NBS laser frequency varied by  $\pm 60$  kHz relative to the NPL lasers, according to the power output of the NBS laser.

A similar comparison was made in May 1980 with a laser from IMM. The conclusion was that, under similar conditions, the IMM laser was about 122 kHz lower in frequency than that of the NPL lasers; this difference was traced to the IMM iodine cell. A comparison of 515 nm iodine-stabilized  $\text{Ar}^+$  lasers was carried out in March 1979 [SPIEWECK, F., CAMY, G. and GILL, P., *Appl. Phys.*, **22**, 1980, pp. 111-112]. Unfortunately the iodine cells of NPL were contaminated.

NBS : Comparisons of He-Ne lasers stabilized on  $^{127}\text{I}_2$  made in 1980 between NBS and BIPM, NPL and IMM, revealed a power shift of about  $2.6 \times 10^{-10}$  for a change in output power from 50 to 220  $\mu\text{W}$  (*Optics Letters*, **6**, 1981, pp. 188-190).

CSMU : Preparation of comparisons of lasers at  $\lambda = 633$  nm with ASMW.

IMM : Comparisons of the frequency of He-Ne lasers at  $\lambda = 633$  nm between IMM, NBS and NPL have shown a systematic difference of about 100 kHz.

BIPM : Participation in five comparisons of methane-stabilized He-Ne lasers at  $\lambda = 3.39$   $\mu\text{m}$ , thirteen comparisons of iodine-stabilized He-Ne lasers at  $\lambda = 633$  nm and one comparison of He-Ne iodine lasers at  $\lambda = 612$  nm.

Results of the comparisons at  $\lambda = 3.39$   $\mu\text{m}$  are published in the *Procès-Verbaux* of the CIPM.

For lasers at  $\lambda = 633$  nm, frequency variations of the NBS laser of  $\sim 70$  kHz were observed when the surface power density is doubled. For the same power density the frequency of the BIPM and NBS lasers is the same with an uncertainty of  $\pm 10$  kHz. The frequency of the IMM laser was  $(99 \pm 10)$  kHz lower than that of BIPM laser.

For  $\lambda = 612$  nm, differences up to 200 kHz were observed between BIPM and IMGIC lasers; these differences were not the same for various components that were studied.

1.4. — *Measurements of frequency intervals*

1.4.1. — *He-Ne lasers ( $\lambda = 612$  nm and  $\lambda = 633$  nm)*

CSIRO : Measurement of the frequency differences between all the components of the transition 10-2, P(110) in  $^{129}\text{I}_2$  at  $\lambda = 612$  nm. Because this spectrum overlaps that of the 9-2, R(47) transition in iodine 127, it was possible to relate these frequencies to the  $^{127}\text{I}_2$  spectrum [CIDDOR, P. E., BROWN, N., *Opt. Comm.*, **34-1**, 1980, pp. 53-56].

PTB : Lasers stabilized on  $^{129}\text{I}_2$  at  $\lambda = 612$  nm : all 28 components of the transition 10-2, P(110) have been resolved whereas only 16 of the 36 HFS components of the weaker transition 14-4, R(113) could be observed. Frequency separations of the HFS components from the component o of the 9-2, R(47) transition of  $^{127}\text{I}_2$  have been published [*Opt. Comm.*, **38**, 1981, pp. 119-123]; concerning the other components of the 9-2, R(47) transition of  $^{127}\text{I}_2$ , see *IEEE Trans.*, **IM-29**, 1980, pp. 354-357.

NPL : A report on the  $^{129}\text{I}_2$  (k) —  $^{127}\text{I}_2$  (i) frequency interval has been submitted [Doc. CCDM/82-2]. A further set of measurements made with an NBS  $^{129}\text{I}_2$  cell at cold-finger temperature of 12 °C or 15 °C gives a value or frequency interval that is  $(10 \pm 5)$  kHz less than the value reported in the preceding document.

NIM : Measurement of frequency intervals between the components of  $^{127}\text{I}_2$  :

$$\begin{aligned} d - e &= 12.86 \text{ MHz} & h - i &= 21.94 \text{ MHz} \\ e - f &= 13.36 \text{ MHz} & i - j &= 21.56 \text{ MHz} \\ f - g &= 13.20 \text{ MHz} \end{aligned}$$

Measurement of frequency intervals between component o of the 9-2, R(47) line of  $^{127}\text{I}_2$  and strong components of  $^{127}\text{I}_2$  and  $^{129}\text{I}_2$  [DSCHAO, K., GLÄSER, M., HELMCKE, J., *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **IM-29**, 1980, pp. 354-357] and [GLÄSER, M., DSCHAO, K., FOTH, H. J., *Opt. Comm.*, **38**, 1981, pp. 119-123].

NBS : A new measurement of the frequency interval between the i component of  $^{127}\text{I}_2$  ( $^{20}\text{Ne}$ ) and the k component of  $^{129}\text{I}_2$  ( $^{20}\text{Ne}$ ) is under way.

ASMW : He-Ne laser at  $\lambda = 633 \text{ nm}$  : measurement of frequency intervals between the components d, e, f, g, h, i, j of the 11-5, R(127) transition of  $^{127}\text{I}_2$ . The results are in agreement with those published by CCDM in 1973, with a relative uncertainty of  $10^{-10}$  to  $10^{-11}$ .

IMGC : He-Ne laser at  $\lambda = 633 \text{ nm}$  : recent measurements confirm the values given in the document CCDM/79-27.

He-Ne laser at  $\lambda = 612 \text{ nm}$  : measurement of frequency intervals between the components h, r, t of the 9-2, R(47) transition of  $^{127}\text{I}_2$  and the component o of the same transition :

component	h	r	t
$\nu - \nu_0$ (MHz)	284.35	— 86.17	— 334.04
uncertainty (MHz)	0.06	0.04	0.02

NRLM : Measurement of the frequency intervals of 20 components, including 6 new components of the R(127) line in the 11-5 band and of 10 components of the P(33) line in the 6-3 band of the B-X electronic band of  $^{127}\text{I}_2$  [MORINAGA, A., TANAKA, K., *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 1978, pp. 114-116].

CSMU : Results of measurements of frequency intervals between components of  $^{127}\text{I}_2$  are given in the Report CSMU-BIPM, 1981 (to be published).

BIPM :  $\lambda = 612 \text{ nm}$  :

Measurement of frequency intervals of the following components :

$^{127}\text{I}_2$ , 9-2, R( 47), components b to u

$^{129}\text{I}_2$ , 10-2, P(110), components  $a_1$  to  $a_{28}$

$^{129}\text{I}_2$ , 14-4, R(113), components  $b_{19}$  to  $b_{36}$  except  $b_{31}$  and  $b_{33}$ .

$\lambda = 633 \text{ nm}$  :

1°  $^{127}\text{I}_2$ , 11-5, R(127) : measurement of frequency intervals between the component i and the components a, b, c, d, e, f, g, h, j, k, l, m, n.

2°  $^{129}\text{I}_2$ , 8-4 (P54) and  $^{127}\text{I}^{129}\text{I}$ , 6-3 P(33) : measurement of frequency intervals between the component k of  $^{129}\text{I}_2$  and the component m of  $^{129}\text{I}_2$  and components l, a, y" of  $^{127}\text{I}^{129}\text{I}$ .

3° Frequency interval between  $^{129}\text{I}_2$ , k and  $^{127}\text{I}_2$ , i. There is a disagreement between BIPM values and the values of NBS, NPL, and CSIRO [document CCDM/82-2]. As a function of the power, the frequency of the component k can shift by  $(-0.7 \pm 0.1) \text{ kHz}/\mu\text{W}$  and, also, a variation of the pressure coefficient as a function of the power was observed for this component k. For axial standing-wave surface power density in

the middle of the iodine cell of  $2$  to  $2.5 \times 10^4 \text{ W m}^{-2}$ , modulation amplitudes peak to peak of  $6 \text{ MHz}$  and an iodine pressure of  $9 \text{ Pa}$ , the result is :

$$i - k = (95.87 \pm 0.03) \text{ MHz}$$

and, with the same power density, but with a pressure of  $17.3 \text{ Pa}$  for  $^{127}\text{I}_2$  ( $t = 15^\circ\text{C}$ ) and  $6.1 \text{ Pa}$  for  $^{129}\text{I}_2$  ( $t = 4^\circ\text{C}$ ), the result is :

$$i - k = (95.95 \pm 0.03) \text{ MHz.}$$

#### 1.4.2. — Argon lasers stabilized with $^{127}\text{I}_2$ at $\lambda = 515 \text{ nm}$

PTB : Measurement of frequency intervals of the components of the strong transition 43-0, P(13) of  $^{127}\text{I}_2$  and also of the components of the weaker transition 58-1, R(98) [contribution to *Europ. Conf. on Atomic Physics*, 1981, pp. 325-326 and *Chem. Phys. Lett.*, **65**, 1979, pp. 347-352].

## 2. Wavelength measurements

### 2.1. — Interferometric measurements of laser wavelengths

PTB : Measurement of the wavelength ratio of  $^{127}\text{I}_2$ -stabilized He-Ne lasers at  $633 \text{ nm}$  and  $612 \text{ nm}$  :

$$\lambda_o/\lambda_i = 0.966\ 791\ 605\ 0; \text{ uncertainty : } \pm 3 \times 10^{-10}$$

$\lambda_o$  : component o of the transition 9-2, R(47)

$\lambda_i$  : component i of the transition 11-5, R(127).

The recommended value (CCDM 1973)  $\lambda_i = 632.991\ 399 \text{ nm}$  yields  $\lambda_o = 611.970\ 770\ 6 \text{ nm}$ .

A new interferometer of the Michelson type has been designed and set up for the more precise determination of wavelength ratios. One mirror can be moved over a distance of  $3.8 \text{ m}$ ; the aperture of the rays amounts to  $60 \text{ mm}$  in diameter.

NPL : Measurement of wavelength ratio of the  $3.39 \mu\text{m}$  methane-stabilized He-Ne laser to component d of the  $633 \text{ nm}$  iodine-stabilized He-Ne laser (cold-finger temperature of  $18^\circ\text{C}$ ,  $6 \text{ MHz}$  peak-to-peak modulation) :

$$\lambda_{\text{CH}_4}/\lambda_{^{127}\text{I}_2, d} = 5.359\ 050\ 040\ 4 \times (1 \pm 1.5 \times 10^{-9}).$$

The relative uncertainty corresponds to the discrepancy between observations made under different conditions, and is roughly ten times the standard deviation of the ratio. The results were repeatable to about  $1 \times 10^{-11}$  over several

sortie des détecteurs synchrones des deux lasers asservis montre une nette amélioration de la stabilité de la fréquence

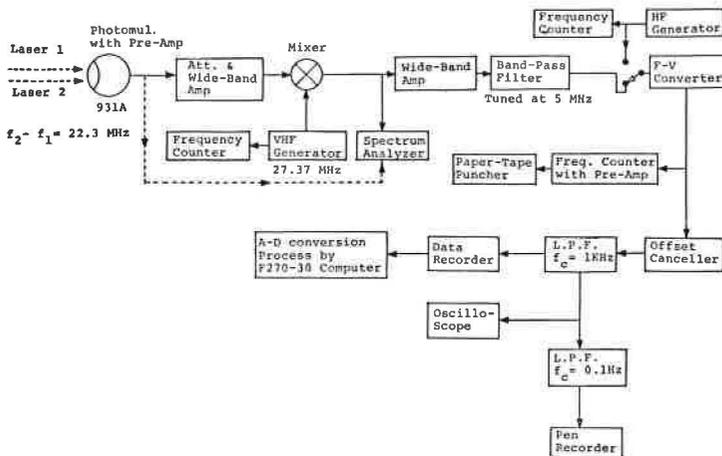


Fig. 7.- Schéma synoptique de la mesure de battements entre les lasers asservis sur l'iode.

lorsqu'on utilise l'asservissement avec intégration. Nous sommes en train d'améliorer la stabilité du système d'asservissement actuel avant de faire des mesures de reproductibilité.

(9 avril et 8 juin 1973)

#### BIBLIOGRAPHIE

1. HANES (G.R.) and DAHLSTROM (C.E.), *Appl. Phys. Lett.*, 14, 1969, pp. 362-364.  
HANES (G.R.) and BAIRD (K.M.), *Metrologia*, 5, 1969, pp. 32-33.
2. WALLARD (A.J.), *J. Phys. E : Sci. Instrum.*, 5, 1972, pp. 926-930.
3. Communication personnelle.

**Mesure de la longueur d'onde  
de lasers à He-Ne (0,633  $\mu\text{m}$  et 3,39  $\mu\text{m}$ )  
asservis sur des raies d'absorption saturée**

Par T. MASUI, S. ASAMI et N. ITO

National Research Laboratory of Metrology (Japan)

(Traduction du Document CCDM/73-8)

---

*Abstract.*— Preparations are being made for the wavelength measurement of 0.633  $\mu\text{m}$  and 3.39  $\mu\text{m}$  lasers, which are stabilized on the saturated absorption lines, using a Möbius-band type Michelson interferometer, which has been designed for the near-infrared lines as well as for the visible. The fractional parts of the interference orders are analyzed from the variation in intensity of the interference fringes for the scan of the atmospheric pressure of an airtight chamber set inside the interferometer.

Des préparatifs sont en cours pour mesurer la longueur d'onde de lasers He-Ne asservis sur des raies d'absorption saturée de l'iode ( $\lambda = 0,633 \mu\text{m}$ ) ou du méthane ( $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ ), par comparaison à la longueur d'onde de la radiation étalon primaire de longueur. L'appareillage et la méthode de mesure sont exposés ci-dessous.

L'installation de mesure est schématisée sur la figure 1. Les faisceaux provenant de la lampe à krypton LA et du laser LB (0,633  $\mu\text{m}$  ou 3,39  $\mu\text{m}$ ) entrent dans le monochromateur S, puis dans l'interféromètre MI après avoir été rendus parallèles par le miroir parabolique  $P_1$ . A la sortie de l'interféromètre, les faisceaux sont focalisés par un autre miroir parabolique  $P_2$  sur les photorécepteurs DA ou DB. Un miroir  $M_1$  permet d'envoyer dans l'interféromètre le faisceau provenant soit de LA soit de LB, et un autre miroir  $M_2$  permet la foca-

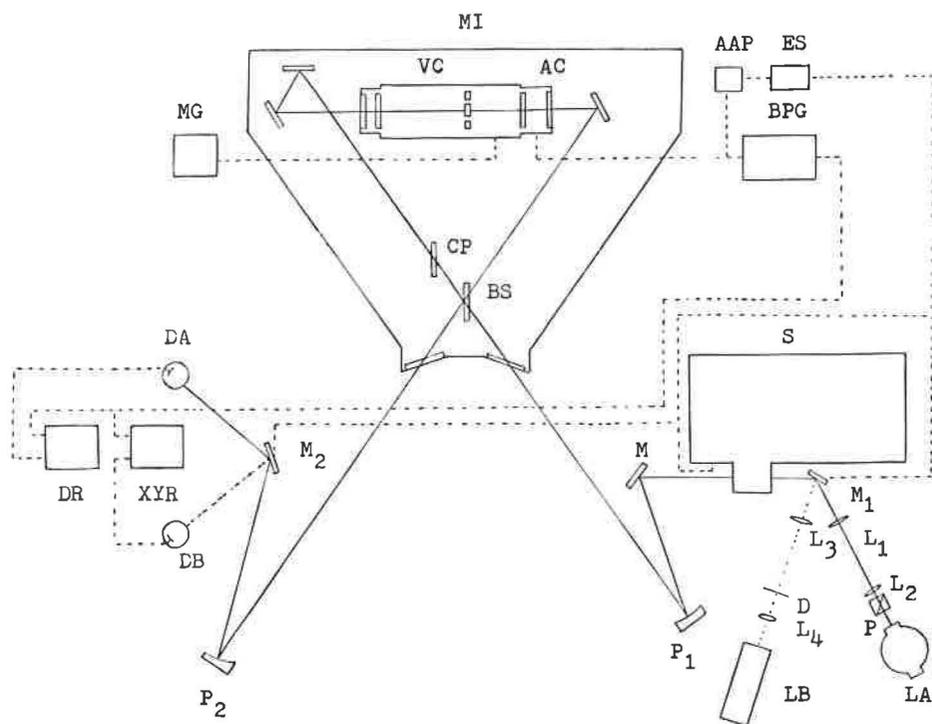


Fig. 1.- Installation de mesure.

LA, LB, Sources de lumière ; P, Polariseur ; L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub>, L<sub>4</sub>, Lentilles ; D, Diffuseur ; M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, Miroirs ; S, Monochromateur ; P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, Miroirs paraboliques ; MI, Interféromètre de Michelson ; BS, lame séparatrice ; CP, lame compensatrice ; AC, chambre étanche ; VC, chambre à vide, AAP, Appareil pour mesurer les variations de la pression de l'air dans la chambre étanche ; BPG, Manomètre de Bourdon ; ES, Système électrique de commande des miroirs M<sub>1</sub> et M<sub>2</sub>, des obturateurs du monochromateur S et de l'appareil AAP ; MG, Jauge de McLeod ; DA, DB, Photorécepteurs ; XYR, Enregistreur X-Y ; DR, Enregistreur numérique.

lisation de ce faisceau soit sur DA soit sur DB. Les commandes de  $M_1$  et  $M_2$  sont couplées entre elles et avec celles des obturateurs placés dans le monochromateur pour isoler la partie utile des faisceaux.

L'interféromètre est un interféromètre de Michelson du type à ruban de Möbius ; il est placé à l'intérieur d'une enceinte calorifugée qui assure la stabilité de la température et supprime les mouvements d'air ; l'ensemble est monté sur des plaques de caoutchouc isolant l'appareil des vibrations du sol. En outre, les lames séparatrice BS et compensatrice CS, ainsi que les fenêtres du monochromateur et de l'interféromètre sont en silice fondue pour permettre les mesures de la raie  $3,39 \mu\text{m}$ .

Pour une différence de trajet optique donnée, les valeurs des longueurs d'onde sont calculées à partir des ordres d'interférence déterminés par la méthode des coïncidences. La partie fractionnaire de l'ordre d'interférence est obtenue par analyse des variations d'intensité des franges d'interférence en fonction de la pression de l'air dans une chambre étanche placée à l'intérieur de l'interféromètre. Plus précisément, la variation de la pression de l'air dans la chambre est mesurée par un manomètre de Bourdon dont le signal est envoyé sur l'entrée X d'un enregistreur X-Y, l'entrée Y recevant le signal des photorécepteurs ; les mesures ainsi enregistrées sont exploitées par un ordinateur.

(9 avril 1973)

---

## **Lasers à He-Ne asservis sur le méthane en utilisant la méthode d'absorption linéaire**

Par Y. AKIMOTO, M. OHI, T. TAKO

National Research Laboratory of Metrology (Japon)

et K. SHIMODA

Département de Physique, Université de Tokyo

(Traduction du Document CCDM/73-9)

---

*Abstract.*- Better stability was obtained for the methane-stabilized laser with the method of linear absorption in an external cell by improvements of the control system. One of the method for improvements is to use a Miller type integrator, and the other is to use a double servo system for high and low frequency components of the error signal. From the analysis of noise spectrum of the error signal, frequency fluctuation was estimated to be smaller than  $3 \times 10^{-11}$  in the frequency range of 1-10 Hz. Long term stability was obtained from the drift of the error signal to be  $\pm 6 \times 10^{-12}/h$ .

### I. INTRODUCTION

Nous avons exposé, à la session précédente (1970) du C.C.D.M., nos travaux sur l'asservissement du laser He-Ne à  $3,39 \mu\text{m}$  sur une raie du méthane en utilisant l'absorption linéaire dans une cellule extérieure refroidie à l'azote liquide ; la variation de la fréquence alors indiquée était de  $8 \times 10^{-11}$  par heure [1]. Ultérieurement, des améliorations ont été apportées au système d'asservissement du laser afin d'obtenir une meilleure stabilité à court terme et à long terme.

A cet effet, deux méthodes ont été employées. L'une consiste à introduire dans le système d'asservissement un intégrateur de Miller pour réduire la dérive de fréquence ; l'autre méthode consiste à employer un système d'asservissement double constitué d'une première boucle d'asservissement

avec un servomoteur comme élément intégrateur pour supprimer les composantes de basse fréquence des fluctuations et d'une deuxième boucle pour supprimer les composantes de haute fréquence des fluctuations produites par les vibrations mécaniques et le bruit électrique.

## II. DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE

La figure 1 donne le schéma synoptique du système d'asservissement équipé avec l'intégrateur de Miller. Le laser est placé dans un champ magnétique atteignant jusqu'à 5600 A/m pour obtenir un aplatissement du sommet de la courbe de gain. La cavité, d'environ 33 cm de longueur, est modulée et accordée par un transducteur piézoélectrique. Le tube laser, avec fenêtres sous l'angle de Brewster, est rempli du mélange

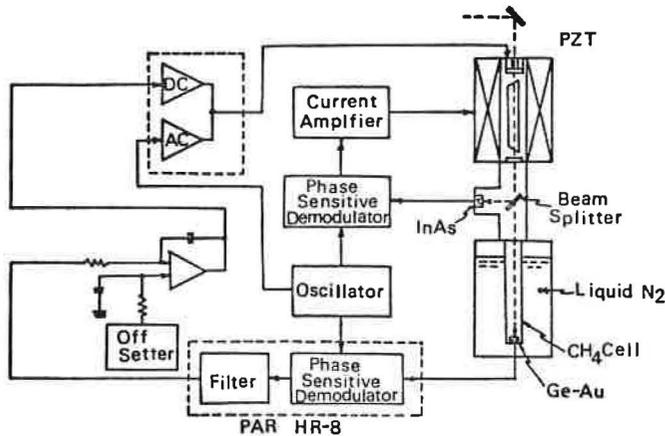


Fig. 1.- Système d'asservissement avec intégrateur de Miller.

$^3\text{He}-^{22}\text{Ne}$  sous une pression totale de 270 Pa. Le faisceau laser traverse la cellule à méthane de 20 cm de longueur, maintenue au point triple de l'azote ou à la température de l'azote liquide, puis est détecté par un récepteur à Ge-Au. Le système d'asservissement comprend un détecteur synchrone, un compensateur de phase, un intégrateur de Miller et un amplificateur à courant continu de haute tension.

La figure 2 donne le schéma synoptique du système d'asservissement double. Le signal d'erreur qui sort du détecteur synchrone est envoyé sur des filtres passe-haut et passe-bas et est divisé en composantes de haute et basse fréquence. La composante du signal d'erreur traversant le filtre passe-haut

ASMW : a) Gauges up to 2 m are measured by an automatic fringe-counting method with a standard deviation  $s = 0.03 \mu\text{m}$  and an uncertainty, ( $P = 0.99$ ),  $u = 0.03 \mu\text{m} + 1 \times 10^{-7} l$  where  $l$  is the length of the gauge in metres.

b) The angle standard includes a measurement system for small angles based upon tangent rule and a measurement system for  $360^\circ$  rotation. For the former, the standard deviation is  $s = 0.02''$  and the uncertainty ( $P = 0.99$ ) is  $u = 0.1''$  in  $15'$ ; for the latter, from  $15'$  to  $360^\circ$ , the standard deviation is  $0.01''$  and the uncertainty ( $P = 0.99$ ),  $u = 0.02''$ .

NRLM : a) A 800 mm long gauge block was measured using an infrared interferometer whose light source is a  $3.51 - 3.37 \mu\text{m}$  simultaneous operation He-Xe laser; the wavelength ratio is determined to an accuracy of  $1.7 \times 10^{-8}$  and the absolute length of the block is measured with an accuracy of  $4.9 \times 10^{-8}$ . This interferometer has a possibility of measuring lengths up to several metres.

b) Twelve laboratories joined in the international comparison of angle standards which was started in December 1980. The measurements have been completed at four laboratories : NRLM, CSIRO, NBS, NPL. Two reports have been received : from CSIRO and NRLM.

IMM : The primary angle standard includes :

- a) an interferometric tester for the realization of the unit and transfer of its value to the domain of small angles;
- b) a photoelectric autocollimator adapted to the optical polygons;
- c) an optical dodecagon in quartz for verifying the stability of the standard.

This primary standard assures the realization of the unit with a standard deviation of  $s = 0.01''$  for 132 measurements of the dodecagon. The systematic residual uncertainty is not greater than  $0.02''$ .

BIPM : Purchase of a 10 cm scale with four intercalated subdivisions each half centimetre with line thickness of 5, 7, 9 and  $11 \mu\text{m}$ . A complete study of the scale has been made. The following effects were observed :

- a) changing the current intensity in the microscope lamps has no noticeable influence;
- b) the dispersion of results of eight calibrations (two for each position of the scale and for each microscope) increases from 7 nm for the thinner lines to 59 nm for the broader (mean

- standard deviations); here « calibration » means determination of the shift of the lines with reference to a linear scale between the first and the last line of the same subdivision.
- c) turning the scale results mainly in an apparent displacement of the three subdivisions with reference to the thinnest line subdivision; this « displacement » reaches  $0.4 \mu\text{m}$  for the broadest line subdivision;
- d) changing the microscope results also in an apparent displacement which reaches  $0.8 \mu\text{m}$  for the broadest line subdivision.
- The observed « displacements » increase with the thickness of lines and are much more important than the error of reproducibility of the setting. Thus, it has been confirmed that the metrological quality of a scale depends mainly upon the similarity of the lines rather than their thickness.

JILA : A reference etalon for dye-laser locking was constructed from fused silica; its optical resonance thickness is 1000 and the stability corresponds at  $\pm 100 \text{ kHz}$  ( $\pm 2 \times 10^{-10}$ ) for several days.

---

APPENDIX M 3

---

**Report of the ad hoc CCDM/CCU Working Group  
to the Comité International des Poids et Mesures**

(April 1981)

by W. R. C. ROWLEY, Rapporteur

---

During the last year the problems linked with a new definition of the metre have given rise to many discussions within the CCDM and the CCU. The prospects discerned on these occasions were different according to the precise aims taken into consideration. This led to various proposals of wording for a new definition. With a view to a complete discussion of the problem, the CIPM, during its meeting in October 1980, proposed that an *ad hoc* Working Group, bringing together members of the CCDM and of the CCU, discuss the question before a final proposal be presented to the CIPM.

The Working Group for the wording of a new definition of the metre met in the Pavillon de Breteuil in Sèvres, April 28-29th, 1981.

Present :

- MM. J. de BOER, President of the CCU, Chairman of the Working Group,
- D. KIND, President of the CCDM,
- H. H. JENSEN, Deputy Secretary of the CIPM,
- B. GUINOT, President of the CCDS.

Delegates of the following laboratories :

- Institut National de Métrologie [NIM], Beijing (H. WU).
- National Bureau of Standards [NBS], Washington and Boulder (D. T. GOLDMAN, K. G. KESSLER).
- National Physical Laboratory [NPL], Teddington (O. C. JONES, W. R. C. ROWLEY).
- National Research Council [NRC], Ottawa (K. M. BAIRD).
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig (F. BAYER-HELMS, S. GERMAN).

The Director of the Bureau International des Poids et Mesures [BIPM]  
(P. GIACOMO).

Also present at the meeting :

J. TERRIEN, Director Emeritus of the BIPM, T. J. QUINN, Deputy  
Director of the BIPM, P. CARRÉ, J.-M. CHARTIER, J. HAMON, R. P. HUDSON  
(BIPM).

Sent regrets :

National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Tokyo  
(K. TANAKA) and Institut de Métrologie D. I. Mendéléev [IMM],  
Leningrad.

The chairman, in opening the session, welcomed the participants and  
indicated the laboratory and advisory committee that each delegate  
represented. He reviewed briefly the reasons for convening the meeting  
and expressed the hope that the discussions might resolve the apparent  
differences of opinion between the CCU and the CCDM as to the  
appropriate wording for a new definition of the metre, based on a fixed  
value for the speed of light.

Mr. Rowley (assisted by Mr. Hamon and Mr. Hudson) was nominated  
as rapporteur, and the agenda was approved.

### **Prospects for the proposal of a redefinition of the metre**

The chairman indicated that the responsibility of the meeting was to  
consider alternative wordings and not to make decisions concerning the  
advisability of redefining the metre. Nevertheless, he thought that it would  
be useful for the CIPM to hear the opinion of those CCDM delegates  
present, as to how certain they were that a definite proposal would be made  
to base the metre on a fixed value for the speed of light, and when they  
thought that such a decision might be taken.

Mr. Baird gave his opinion that there would be enough experimental  
work completed within a year for the recommendation to be made. This  
would give time for the proposal to be put to the CGPM in 1983. There  
were frequency measurements in progress at NBS, NRC and NPL that were  
likely to produce results by early 1982 for absolute frequency values in the  
visible spectral region with relative uncertainties of  $1 \times 10^{-10}$  or better.  
Uncertainties of  $1 \times 10^{-13}$  could ultimately be expected, with phase-locked  
measurements, although such accuracy would probably not be achieved  
within the year.

Mr. Kessler agreed that it was most likely that the recommendation  
could be made in about a year's time. He pointed out that as these  
frequency measurements would be the primary means of realization of the  
redefined metre (through the relation  $\lambda = c/f$ ), the meeting of the CCDM

should not take place too soon, so that the « mise en pratique » could take advantage of as many new measurements as possible.

Mr. Bayer-Helms considered that, before the CCDM would be able to make the recommendation, it would be necessary to have several independent measurements of visible laser frequencies with significant accuracy gain over the  $4 \times 10^{-9}$  uncertainty of the  $^{86}\text{Kr}$  definition. He suggested that, for example, an uncertainty of  $1 \times 10^{-10}$  by direct frequency measurement would be an adequate and realistic target.

Mr. Rowley, however, considered that the present level of accuracy, achieved by a combination of infrared frequency measurements and infrared-to-visible interferometry, already represented an adequate improvement in accuracy. Two measurements with uncertainties less than  $1 \times 10^{-9}$  but differing by  $1 \times 10^{-9}$  had been reported: an NBS measurement of the red He-Ne laser, via the  $3.39 \mu\text{m}$  methane-stabilized laser, with an uncertainty of  $6 \times 10^{-10}$ , and an NPL measurement of the same visible laser, via a  $\text{CO}_2$  laser, with an uncertainty of  $6 \times 10^{-10}$ . He further considered that the suggested target of  $1 \times 10^{-10}$  was unnecessarily stringent, as it was at the limit of what could be achieved by the present techniques of interferometric wavelength measurement, and very much better than any requirement of length metrology. He thought that the change of the metre definition should be made as soon as possible, so as to reduce the uncertainty of the wavelength values of the stabilized lasers recommended as standards for length metrology and in the measurement of physical constants.

The chairman thanked the CCDM delegates for their opinions on this matter. It seemed that the CCDM was likely to recommend a redefinition next year, although the issue could not be prejudged by the present *ad hoc* committee, and a postponement was always possible. In discussion with Mr. Giacomo, it was agreed that the appropriate dates for the CCDM to meet next year would be 2nd, 3rd, 4th June 1982. The CCU could then meet the following week (8th, 9th, 10th June 1982) in the expectation of being able to have a final discussion on the wording of the redefinition proposal.

### **Alternative wordings for the redefinition of the metre**

A list of the four alternative proposals under consideration had been circulated (Doc. GT-MU/N° 2). All four, despite their apparent differences, would base the metre on the fixed value 299 792 458 m/s for the speed of light. The chairman suggested that, for identification in discussion, the proposals should be referred to by the following numbers:

1) The metre is the length equal to  $9\,192\,631\,770/299\,792\,458$  wavelengths in vacuum of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the fundamental state of the atom of caesium 133.

2) The metre is the length equal to  $f/299\,792\,458$  wavelengths in vacuum of an infinite plane electromagnetic wave whose frequency is  $f$  hertz.

3) The metre is the length equal to the wavelength in vacuum of an infinite plane electromagnetic wave whose frequency is 299 792 458 hertz.

4) The metre is the length equal to the path travelled in vacuum by infinite plane electromagnetic waves during a time interval of  $1/299\,792\,458$  of a second.

### **Presentation of submitted documents**

A number of documents had been submitted to the meeting by delegates, and by those eligible but unable to attend, in which they had indicated their preferred form of redefinition wording and the reasons for their preference.

The CCU had considered the redefinition question at its 7th meeting in May 1980, and an extract from its report on the subject (Doc. GT-MU/N° 1) was presented. The CCU had preferred definition (1) or (2). The main reason was that they specified a wavelength, as does the present  $^{86}\text{Kr}$  definition, so that it would represent only a small change to the *Système International d'Unités*. It is, moreover, in definition (1), a simplification that a single standard (the caesium transition) would be used to define both the metre and the second. Also, unlike the other wordings, this definition does not depend upon a prior definition of the unit of time (or frequency), so that no change in the order of the base units would be required. The main disadvantages foreseen were the unwieldy numerical factor and the explicit mention of the caesium standard so that any future redefinition of the second would require a corresponding redefinition of the metre.

The CCDM at its 6th session in June 1979 had considered the wording of the redefinition only briefly, the main discussion at that time having been concerned with the advisability of using the speed of light as the basis of a redefinition. Nevertheless, the CCDM had proposed definition (4) (Recommendation M2 (1979), p. M17). The argument to which greatest weight had been attached was the ease of comprehension by the non-specialist, bearing in mind that the definition would be published in textbooks and in general articles about the SI.

The NBS in a letter to the chairman of the CCDM (Doc. CCDM/80-1) had indicated a preference for wording (2) because it has a close correspondence to metrological practice at the highest level of accuracy. It does not specify any particular frequency, so that each laboratory may choose that which is most convenient for its purpose. The NBS had subsequently published a letter in *Journal of the Optical Society of America* requesting comments concerning the redefinition proposals (Docs. CCU/81-1,

CCDM/80-4). There had not been a large number of replies but, as a result of these and other discussions, the NBS was now of the opinion that wording (4) was preferable (Doc. GT-MU/N° 7). Indeed it was indicated that Hall, Ramsey and Purcell, whose names had been linked with wording (2) (Doc. GT-MU/N° 2), now support (4). The preference for (4) was due to its obvious simplicity and its direct application to long-distance measurement, provided that such application were restricted to a single inertial frame at a constant gravitational potential.

Mr. Frenkel in a letter (Doc. CCU/81-2) indicated a preference for (4). This preference was because the wording was simple and communicable to the majority of people; and because in his opinion the most pressing requirement for length specification at high precision, apart from metrology, was to report optical transit-times in astrophysical experiments.

The CSIRO in a letter from Mr. Blevin (CCU/81-3, CCDM/80-3) supported proposal (4). The CSIRO believed that the conceptual simplicity of the wording was more important than its closeness to practical realization. The laboratory had also published a request for comments on the redefinition proposals (Doc. GT-MU/N° 6) in which the preference for (4) is elaborated, stressing that a definition needs to be conceptual rather than operational.

Mr. Terrien (Docs. CCU/81-4, CCDM/80-6) expressed strong support for (4). It satisfied two important criteria : to be simple and understandable by the non-physicist, and to be unambiguous to a physicist. The other formulations would be equivalent from the point of view of physics, but they introduce unnecessary and complicating concepts for the non-physicist. He no longer favoured (3), although he had proposed it some years ago and it had been linked with his name in Doc. GT-MU/N° 2.

The NPL (Docs. CCU/81-5, CCDM/81-1) preferred wording (2). The main reason was that it suggests a means of realization that is in accordance with present laboratory practice. Mr. Rowley presented an additional paper (Doc. GT-MU/N° 11) in which this preference is expressed in numerical form. A list of 7 desirable properties is associated with weighting factors according to the relative importance of each property, and the various definition wordings are given numerical scores according to the extent to which they possess each property, multiplied by the associated weighting factors. On this basis the second best choice of wording would be (4).

The IAU in a letter from Mr. Cook (Docs. CCU/81-6, CCDM/81-2) clearly favoured wording (4), believing it to be clear, unambiguous and physically reliable.

The NRLM in Doc. GT-MU/N° 4 supported wording (3). A wavelength basis was favoured because it is easier for realizing the standard metre, and wording (3) was considered best in this group because it was independent of any particular material and had the advantage of simple expression without ambiguity for the non-specialist.

The BNM in an article by Mr. Bouchareine in the *Bulletin du BNM* (Doc. GT-MU/N° 5) has reviewed the choices for a redefinition and expressed preference for (4). It was considered the simplest, and one that

could be understood by the non-specialist. It would allow recommendations for its realization to be made by the most appropriate means, so that it had good prospects for a long life.

The PTB submission (Doc. GT-MU/N° 8) discussed the general aspects of length measurement in different fields of application and the relationship to the speed of light. It pointed out that an independent metre definition based on a selected molecular transition would permit a more accurate realization than would a definition based on a fixed value for the speed of light. Of the four wordings under consideration, only (2) and (4) were considered to be practical, and both were considered to be adequately comprehensible. The preference was for (2) as it is closely related to the realization of the unit of length without any restriction on the realizing laser system, and it is based upon wavelength, as is the present definition.

The NIM in a brief letter (Doc. GT-MU/N° 9) favoured wording (2) as it indicates the method of realization that is appropriate for laboratory measurements. The second choice would be wording (4).

The NRC (Doc. GT-MU/N° 10) strongly supported wording (4) because it is clear, uses simple concepts, and is precise and scientifically sound. Considerations of realization, it was suggested, should not interfere with the elegance of the definition itself.

### Discussion of submitted documents

In a general discussion of the submitted documents, various other considerations and points of view were noted. It was agreed that all four proposals served the main aim of defining the metre so that the speed of light had the fixed value 299 792 458 m/s; that the differences were mainly a question of form, and that the choice of wording should not be allowed to become a reason for delaying a decision on the redefinition of the metre.

On the subject of relativity, most delegates were of the opinion that there was no serious problem. The NBS (Doc. GT-MU/N° 7) had suggested that a note be added to the definition (4) to indicate that travel in a single inertial frame is meant. Mr. de Boer was in favour of this. Mr. Goldman agreed that wordings (2) and (4) were equivalent from the point of view of relativity. Mr. Baird also agreed (Doc. GT-MU/N° 10), and pointed out that astronomical time-of-flight observations would need relativistic corrections even if wording (4) were adopted.

Mr. de Boer noted that wordings (2) and (4) did not specify any particular radiation, so that there might at some time be a problem arising from dispersion. Also, the arbitrary numerical value  $f$  in (2) would be particularly difficult to explain to the non-physicist and was undesirable in a definition.

In discussion on the relative simplicity of the proposals, Mr. Guinot stressed the point made earlier by Mr. Terrien that the definition should be understandable by all, and not just by a few specialists. Mr. Baird agreed, but preferred to stress the generality and scientific elegance of (4). It was

not only easy to understand, it was also mathematically simple. He further suggested that with such a definition it was unlikely that the need would arise for a further redefinition in the future. The CCU delegates, however, did not view this permanence as a very important consideration. With regard to the CCU preference for a wavelength basis in the definition, so that it would be similar to the existing  $^{86}\text{Kr}$  definition, Mr. Terrien pointed out that redefinitions usually involved a complete change of concept, but that this did not damage the SI as the names and magnitudes of the units remained unchanged. He gave as examples the change from the rotation of the Earth to a caesium frequency for the second, and from a length bar to a krypton wavelength for the metre. (Mr. Bouchareine had expressed a similar point of view in Doc. GT-MU/N° 5). Mr. Baird suggested that wavelength was in any case not a fundamentally important concept and that it would be better for spectroscopists to use the frequency of a spectral transition rather than its wavelength. He thus preferred wording (4) in which there is no mention of wavelength. Mr. Rowley agreed that frequency was the more fundamental quantity in physics, for example in the relation  $E = h\nu$ ; he therefore preferred a definition that mentioned frequency, and in particular wording (2). Mr. Bayer-Helms said that of course frequency is the spectral quantity to be preferred for spectroscopy, but that no length could be measured by frequency alone. To determine a length from frequency it is necessary to introduce the concept of wavelength, so that this again gives a preference for wording (2).

Mr. Rowley argued that a definition should preferably suggest, although not in detail, its primary means of realization. There was a precedent for this in the present definitions of the metre, second, ampere and candela. He furthermore considered that it was the realization of one unit that was important, and this was the basis of his preference for (2). Mr. Baird disagreed that the 1-m length had particular significance in this context, and considered that the realization of long distances was equally important. Mr. Guinot believed that long distances might soon be measurable by time-of-flight methods to an accuracy better than that attainable over short distances by interferometry, and that there was an urgent need to transform such transit-time measurements into lengths. There was some disagreement about whether or not interferometry was fundamentally more accurate than transit-time measurement, as the former is concerned with phase comparison rather than photon detection. There was also discussion as to whether long-distance measurements need a high absolute accuracy, or only good reproducibility and a more modest relative accuracy. Mr. Kind pointed out that from the point of view of suggesting a realization, wordings (1) and (3) were particularly unfortunate as they made reference to particular radiations that were quite unsuitable for practical application and would probably never be used for precise length measurement. Mr. Terrien and Mr. Baird suggested that some length-measurement technique other than interferometry or time-of-flight measurement might eventually be developed, so that it could be a mistake

to base the definition only on one means of realization that happened to be appropriate today.

### **Suggestions for modifications to the definition wordings**

During the discussions, suggestions were made for alterations to the wordings of the definition proposals. As such alterations need careful consideration, delegates were not pressed to express an opinion on them during the meeting.

(a) The use of the word « light » in place of electromagnetic wave(s) in wordings (2) and (4). By thus restricting the range of frequencies, the problem of dispersion (should it arise) would be reduced, and could be eliminated at some later date by adding a note to the definition so as to specify the meaning of « light ». Mr. Rowley believed that, at least in theory, there might be dispersion at very low frequencies due to the rest mass of the photon, and at high frequencies due to the quantization of space. It was thus necessary to eliminate these two extremes from the metre definition.

(b) The use of « free space » instead of « in vacuum », as in English « free space » incorporates the concept of « field free ».

(c) Mr. Rowley preferred the use of « continuous » plane waves in wordings (2) and (4) rather than « infinite ». He considered that infinite is rather ambiguous and could be interpreted as infinite in amplitude as well as in both lateral and longitudinal dimensions.

With the above modifications (a), (b), (c) the wordings (2) and (4) would become :

(2a) « The metre is the length equal to  $f/299\,792\,458$  wavelengths in free space of light propagating as continuous plane waves of which the frequency, expressed in hertz, has the numerical value  $f$ . »

(4a) « The metre is the length equal to the distance travelled by light propagating as continuous plane waves in free space in a time interval of  $1/299\,792\,458$  of a second. »

(d) Two alternative wordings for definition (2) were contained in the submitted documents (Docs. CCU/81-5, CCDM/81-1 and GT-MU/N° 5). Neither avoids the problem of the arbitrary frequency.

(e) Mr. Bayer-Helms proposed a fifth wording for the definition :

(5) « The metre is the length such that the speed of light is equal to  $299\,792\,458$  metres per second. » The advantage of this wording is that it specifies directly the fact that is important, namely, the fixed numerical value for the speed of light, and makes no immediate suggestion as to any particular realization. It may be supplemented by wordings (2) and (4) as examples of its means of realization. It is, however, more a description of

how the metre should be defined than a positive definition of the metre. It was also considered unwise to base the metre upon a speed, as this would make speed the base quantity and length a derived quantity. It was thought that the CCU would find this unacceptable.

(f) The chairman suggested that if wording (1) had the following note added to it, it might then attract the support of those who otherwise preferred wording (2) : « In practice any other radiative transition can be used provided its frequency can be specified in terms of the frequency 9 192 631 770 Hz of the transition given above. »

The NPL and PTB, however, considered that even in the modified form wording (1) was unsatisfactory. It still contained the strong implication that the caesium radiation is the primary standard for the realization of the metre.

### **Search for a consensus; synthesis and conclusion**

The chairman suggested that following the various arguments expressed by the delegates and in the submitted documents, the different wordings for the definition could usefully be classified into three groups having the following desirable characteristics :

- (A) Scientific generality, simplicity and clarity.
- (B) Minimal disturbance to the SI.
- (C) Closeness to practical realization.

The differences of opinion as to the best wording are due to the different weightings given to these three aspects by each delegate or laboratory.

Aspect (A) favours wordings (4) and (5) equally, with wording (3) some way behind.

Aspect (B) favours wording (1).

Aspect (C) favours wording (2) and/or wording (4).

Aspect (C), although weighted highly by some delegates, presents a problem in that opinion is divided as to which wording it favours. Wording (2) is appropriate for laboratory measurements of lengths in the region of 1 m, carried out by interferometry; whereas wording (4) is appropriate for long distances determined by time-of-flight methods in geodesy and astronomy. Thus the IAU and other astronomers consider that aspect (C) favours wording (4). The major laboratories concerned primarily with interferometric measurement, however, are divided as to the relative importance of long-distance and short-distance measurement. In particular, the NIM, NPL and PTB consider that aspect (C) favours wording (2), whereas the NRC and NBS considered that it favoured (2) and (4) equally.

The majority of delegates considered that aspect (B) was of lower

importance than the other two. This aspect had, however, been the major concern of the CCU in its discussion in 1980, and had led to the difference of opinion from that of the CCDM in 1979. Even if a low weight is to be given to (B), however, this aspect would probably eliminate wording (5).

There was no consensus as to whether aspect (A) was more or less important than aspect (C). Nevertheless the general feeling was that aspect (C) was at least sufficiently important to make it difficult to accept wording (1) or wording (3) which make reference to a radiation that is quite unsuitable for practical realization. Thus only wordings (2) and (4) remain as possibilities, the choice between them being dependent upon the above consideration of weighting.

In summing up, the chairman noted that the majority of opinions submitted to the meeting had been in favour of wording (4), and that many people had changed their minds on the subject during the last few years, and indeed during the last few months. The differences between the wordings were thus not very significant and the difficulty of making a choice should not be made a reason for delaying a redefinition. He recalled that the CCDM delegates present considered it quite likely that a definition based on a fixed speed of light could be recommended at their next meeting in 1982.

In closing the meeting, the chairman thanked the delegates for a fruitful discussion that had clarified the situation. On behalf of his colleagues, Mr. Bayer-Helms thanked the chairman for having objectively guided the meeting towards a satisfactory conclusion.

### Summary of the conclusions

1. A new definition of the metre based on the speed of light should be proposed to the CGPM in 1983, as the present definition is no longer sufficient for the most precise experiments realized in some laboratories.
2. To this end, the CCDM and the CCU must hold a meeting in 1982 in order to submit to the CIPM an acceptable proposal.
3. The various wordings which have been examined by the Working Group are scientifically satisfactory and will have similar consequences from the point of view of length measurement technology.
4. The different preferences expressed arise from a different weighting of considerations such as simplicity, generality and clarity, minimal disturbance to the SI or closeness to practical realization.
5. Finally, among the majority of the members of the Working Group, agreement was reached on a definition based on the path travelled by light in a given time interval.

**Documents submitted to the members  
of the CCDM/CCU Working Group**

Almost all of these documents have been distributed to the members of the CCDM and the CCU as well as to the members of the Working Group concerned. The equivalence between the three numberings is indicated below in order to permit the identification of the documents. The detailed list of these documents is given in the Annexe M 1 (*see* p. M 19) of the present report of the Comité Consultatif pour la Définition du Mètre, 7th meeting, 1982.

CCDM/80-1			
80-2			
80-3			
80-4	= CCU/81-1		
80-6	81-4		
81-1	81-5		
81-2	81-6		
81-3	81-7	= GT-MU/N°	0
81-4	81-8	N°	1
81-5	81-9	N°	2
81-6	81-10	N°	3
81-7	81-11	N°	4
81-8	81-12	N°	5
81-9	81-13	N°	6
81-10	81-14	N°	7
81-11	81-15	N°	8
81-12	81-16	N°	9
81-13	81-17	N°	10
81-14	81-18	N°	11
81-15	81-19	N°	12

---

## APPENDIX M 4

---

**Source data for the list  
of recommended radiations, 1982**

---

This Appendix has been derived from Document CCDM/82-4 taking into account the new data presented at the 7th meeting of the CCDM.

The numbers in brackets refer to the bibliography and notes at the end of this Appendix.

Values of frequency (and wavelength) may be influenced by certain experimental conditions such as the pressure and the purity of the absorbing medium, the power transported by the beam through the medium and the beam geometry, as well as by other effects originating outside the laser itself and related to the servo-system. The magnitude of these influences will remain inside the limits of uncertainty indicated provided that the conditions of operation lie within the domain of the ensemble of those of the measurements referred to below.

1.1. — *Transition  $\nu_3$ ; P(7) component  $F_2^{(2)}$  of the molecule  $\text{CH}_4$  ( $\lambda \approx 3.39 \mu\text{m}$ )*

Absolute frequency determinations :

NBS, 1972 [1]	$f_{\text{CH}_4} = (88\,376\,181\,627 \pm 50) \text{ kHz}$
NPL, 1976 [2]	$608 \pm 43$
VNIIFTRI *, 1979 [3, 7]	$596.4 \pm 10$
NRC, 1979 [4]	$570 \pm 200$
NPL, 1980 [5]	$616 \pm 3$
LPTF **, 1980 [6]	$618 \pm 13.8$
VNIIFTRI, 1981 [7]	$603.4 \pm 1.4$
LPTF, 1981 [8]	$612 \pm 11$
IT ***, 1981 [9]	$603.0 \pm 3.0$

The determinations whose uncertainty is greater than  $\pm 20 \text{ kHz}$  have

---

\* Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques (Moscou).

\*\* Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences (Paris).

\*\*\* Institut de Thermophysique (Novosibirsk).

not been taken into account to calculate the mean; the mean is not weighted.

Mean	$f_{\text{CH}_4} = 88\,376\,181\,608.1$ kHz,
standard deviation of the mean	3.5 kHz.

The uncertainty due to the lack of frequency reproducibility of the radiation emitted by a laser stabilized by saturated absorption of methane is evaluated at  $\pm 5$  kHz.

Corresponding standard deviation	1.7 kHz,
combined uncertainty (standard deviation)	3.9 kHz,
relative uncertainty	$0.44 \times 10^{-10}$ .

A relative determination (NRC, 1977 [10]) gives

$$f_{\text{CH}_4} = 88\,376\,181\,611 \text{ kHz.}$$

Adopted value :

$f_{\text{CH}_4} = 88\,376\,181\,608$ kHz,	
standard deviation	3.9 kHz,
relative standard deviation	$0.44 \times 10^{-10}$ .

From which is deduced the corresponding wavelength :

$\lambda_{\text{CH}_4} = 3\,392\,231\,397.0$ fm,	
standard deviation	0.15 fm,
relative standard deviation	$0.44 \times 10^{-10}$ .

[The value recommended by the CCDM, 5th session, Recommendation M 1 (1973), was

$$\lambda_{\text{CH}_4} = 3\,392\,231.40 \times 10^{-12} \text{ m,}$$

with an estimated relative uncertainty of  $\pm 4 \times 10^{-9}$  which results from an estimated relative standard deviation of  $1.3 \times 10^{-9}$ .]

1.2. — *Transition 17-1; P(62), component o, of the molecule  $^{127}\text{I}_2$  ( $\lambda \approx 576$  nm)*

1.2.1. — *Determination of the frequency of this component by frequency measurements only*

NBS, 1982 [11]	$f_o = 520\,206\,808.535$ MHz,
relative standard deviation	$1.5 \times 10^{-10}$ .

1.2.2. — *Determination of the frequency  $f_o$  from  $f_i$  (see 1.3)*

The following value has been obtained for the ratio of the frequency  $f_o$  of this transition to the frequency hereafter denoted by  $f_i$ :

NPL, 1982 [12]	$f_o/f_i = 1.098\,381\,317\,26$
relative standard deviation	$1 \times 10^{-10}$ .

Using the value of  $f_i$  and its standard deviation (*see* 1.3.4), one obtains

$$\begin{array}{r} f_o = 520\,206\,808.362 \text{ MHz,} \\ \text{relative standard deviation} \qquad \qquad \qquad 3.5 \times 10^{-10}. \end{array}$$

1.2.3. — *Mean value of the frequency  $f_o$*

With the values of  $f_o$  given in 1.2.1 and 1.2.2, a weighted mean is calculated (*see*, in the list of recommended radiations, 1982, the Note \*\*)

$$f_o = 520\,206\,808.508 \text{ MHz.}$$

Calculation of the standard deviation of this mean, taking into account the weighting, leads to a value of 0.063 MHz. Given the small number of determinations, the CDDM has decided that it was prudent to calculate the standard deviation without weighting, so one obtains 0.106 MHz.

Adopted value

$$\begin{array}{r} f_o = 520\,206\,808.51 \text{ MHz,} \\ \text{standard deviation} \qquad \qquad \qquad 0.11 \text{ MHz,} \\ \text{relative standard deviation} \qquad \qquad 2.0 \times 10^{-10}; \end{array}$$

from which

$$\begin{array}{r} \lambda_o = 576\,294\,760.27 \text{ fm,} \\ \text{standard deviation} \qquad \qquad \qquad 0.12 \text{ fm,} \\ \text{relative standard deviation} \qquad \qquad 2.0 \times 10^{-10}. \end{array}$$

1.3. — *Transition 11-5; R(127), component i, of the molecule  $^{127}\text{I}_2$  ( $\lambda \approx 633 \text{ nm}$ )*

1.3.1. — *Determination of the frequency of this component from  $f_{\text{CH}_4}$*

The ratio of this frequency  $f_i$  to that of methane may be determined indirectly using another radiation (another component of the same transition or another transition of  $^{127}\text{I}_2$  or  $^{129}\text{I}_2$ ); if  $f_x$  is the frequency of this radiation and  $\lambda_x$  its wavelength in vacuum,  $f_x/f_{\text{CH}_4}$  is determined by a measurement of  $\lambda_{\text{CH}_4}/\lambda_x$ , the required ratio is calculated taking into account the difference in the frequencies:

$$\frac{f_i}{f_{\text{CH}_4}} = \frac{f_x}{f_{\text{CH}_4}} + \frac{f_i - f_x}{f_{\text{CH}_4}} = \frac{\lambda_{\text{CH}_4}}{\lambda_x} + \frac{f_i - f_x}{f_{\text{CH}_4}}$$

From the values

NBS, 1976 [13]	$f_i/f_{\text{CH}_4} = 5.359\,048\,173\,77 \times (1 \pm 0.22 \times 10^{-9})$
NPL, 1982 [12]	$172\,57 \times (1 \pm 0.2 \times 10^{-9})$
PTB, 1982 [14]	$174\,3 \times (1 \pm 0.35 \times 10^{-9})$

the corresponding values of  $f_i$  are obtained

NBS, 1976	$f_i = 473\,612\,214\,651$ kHz
NPL, 1982	545
PTB, 1982	698

The following, less precise, values are also available but they have not been used

NPL, 1979 [15]	$f_i/f_{\text{CH}_4} = 5.359\,048\,172\,54 \times (1 \pm 1.5 \times 10^{-9})$
PTB, 1979 [16]	186 $\times (1 \pm 2 \times 10^{-9})$
IMM, 1981 [17]	164 69 $\times (1 \pm 3.6 \times 10^{-9})$

1.3.2. — *Determination of the frequency  $f_i$  from the frequency of the transition R(12) of CO<sub>2</sub> ( $\lambda \approx 9.3$   $\mu\text{m}$ )*

From the value

NPL, 1978 [18]	$f_i/f_{\text{CO}_2} = 14.719\,388\,536 \times (1 \pm 0.4 \times 10^{-9})$
----------------	--

and taking the given value

$$f_{\text{CO}_2} = (32\,176\,079\,482 \pm 14) \text{ kHz},$$

one obtains

$$f_i = 473\,612\,215\,461 \times (1 \pm 0.6 \times 10^{-9}) \text{ kHz}.$$

The following less precise value is also available but has not been used

NPL, 1974 [19]	$f_i/f_{\text{CO}_2} = 14.719\,388\,548 \times (1 \pm 1.4 \times 10^{-9})$
----------------	--

1.3.3. — *Determination of the frequency  $f_i$  by frequency measurements only*

NBS, 1982 [20]	$f_i = 473\,612\,214\,827$ kHz,
relative standard deviation	$1.6 \times 10^{-10}$ .

1.3.4. — *Mean value of the frequency  $f_i$*

The ensemble of values of  $f_i$  indicated in 1.3.1, 1.3.2 and 1.3.3 gives :

Unweighted mean	$f_i = 473\,612\,214\,836$ kHz,
standard deviation of the mean	163 kHz.

Adopted value :

	$f_i = 473\,612\,214.8$ MHz,
standard deviation	0.16 MHz,
relative standard deviation	$3.4 \times 10^{-10}$ ;

from which

	$\lambda_i = 632\,991\,398.1$ fm,
standard deviation	0.22 fm,
relative standard deviation	$3.4 \times 10^{-10}$ .

[The value recommended by the CCDM, 5th meeting, Recommendation M 1 (1973), was

$$\lambda_i = 632\,991.399 \times 10^{-12} \text{ m,}$$

with an estimated relative uncertainty of  $\pm 4 \times 10^{-9}$  which results from an estimated relative standard deviation of  $1.3 \times 10^{-9}$ .]

1.4. — *Transition 9-2; R(47), component o, of the molecule  $^{127}\text{I}_2$  ( $\lambda \approx 612 \text{ nm}$ )*

The following values have been obtained for the ratio of the frequency  $f'_o$  of this transition to the above frequency  $f_i$ :

LHA-BIPM, 1979 [21]	$f'_o/f_i = 1.034\,349\,072\,88 \times (1 \pm 3 \times 10^{-10})$
BIPM, 1979 [22]	$072\,21 \times (1 \pm 3.6 \times 10^{-10})$
PTB, 1980 [23]	$072\,57 \times (1 \pm 3.4 \times 10^{-10})$
NPL, 1982 [12]	$072\,43 \times (1 \pm 1 \times 10^{-10})$
BIPM, 1982 [24]	$071\,90 \times (1 \pm 2.1 \times 10^{-10})$

Unweighted mean  $f'_o/f_i = 1.034\,349\,072\,40$ ,  
 standard deviation of the mean  $1.6 \times 10^{-10}$ .

This leads to

$f'_o = 489\,880\,355.1 \text{ MHz}$ ,  
 standard deviation  $0.18 \text{ MHz}$ ,  
 relative standard deviation  $3.7 \times 10^{-10}$ ;

from which

$\lambda'_o = 611\,970\,769.8 \text{ fm}$ ,  
 standard deviation  $0.23 \text{ fm}$ ,  
 relative standard deviation  $3.7 \times 10^{-10}$ .

[The value indicated by the CCDM, 6th session, 1979, was

$$\lambda'_o = 611\,970\,771 \text{ fm,}$$

with an estimated relative uncertainty of  $\pm 4 \times 10^{-9}$  which results from an estimated relative standard deviation of  $1.3 \times 10^{-9}$ .]

1.5. — *Transition 43-0; P(13), component a<sub>3</sub> (sometimes called s) of the molecule  $^{127}\text{I}_2$  ( $\lambda \approx 515 \text{ nm}$ )*

The following values have been obtained for the ratio of the frequency  $f_{a_3}$  of this transition to the frequency  $f_i$ :

BIPM, 1979 [25]	$f_{a_3}/f_i = 1.229\,889\,317\,61 \times (1 \pm 4.3 \times 10^{-10})$
PTB, 1979 [26]	$318\,15 \times (1 \pm 5 \times 10^{-10})$
NPL, 1982 [12]	$316\,88 \times (1 \pm 1 \times 10^{-10})$
BIPM, 1982 [27]	$316\,88 \times (1 \pm 2.5 \times 10^{-10})$

Unweighted mean  $f_a/f_i = 1.229\ 889\ 317\ 38$ ,  
 standard deviation of the mean  $3.1 \times 10^{-10}$ .

This leads to

$f_a = 582\ 490\ 603.6$  MHz,  
 standard deviation  $0.25$  MHz,  
 relative standard deviation  $4.3 \times 10^{-10}$ .

from which

$\lambda_a = 514\ 673\ 466.2$  fm,  
 standard deviation  $0.22$  fm,  
 relative standard deviation  $4.3 \times 10^{-10}$ .

[The value given by the CCDM, 6th session, 1979, was

$$\lambda_a = 514\ 673\ 467 \text{ fm,}$$

with an estimated relative uncertainty of  $\pm 4 \times 10^{-9}$  which results from a standard deviation of  $1.3 \times 10^{-9}$ .]

### 2.1. — Transition $2p_{10}-5d_5$ of the atom $^{86}\text{Kr}$ ( $\lambda \approx 606$ nm)

Let  $f_{\text{Kr}}$  be the frequency of the radiation corresponding to this transition, emitted under the conditions recommended by the CIPM [28, 29]. Following the definition of the metre (1960) [29] and taking into account the experimental mean value obtained on the basis  $\lambda_{\text{Kr}}$  [30] for the wavelength of the radiation corresponding to the component  $i$  of the transition 11-5; R(127) of the molecule  $^{127}\text{I}_2$ , one can calculate the ratio

$$\begin{aligned} f_{\text{Kr}}/f_i &= (\lambda_i)_{\text{Kr}} \times (1/\lambda_{\text{Kr}}) \\ &= 632\ 991\ 398.5 \times 10^{-15} \times 1\ 650\ 763.73 = 1.044\ 919\ 242\ 05 \end{aligned}$$

from which  $f_{\text{Kr}} = 494\ 886\ 516.5$  MHz,

standard deviation  $0.6$  MHz,  
 relative standard deviation  $1.3 \times 10^{-9}$ ;

and  $\lambda_{\text{Kr}} = 605\ 780\ 210.2$  fm,

standard deviation  $0.8$  fm,  
 relative standard deviation  $1.3 \times 10^{-9}$ .

The relative uncertainties of the values of  $f_{\text{Kr}}/f_i$  and of  $f_i$  or  $\lambda_{\text{Kr}}$  are estimated as  $\pm 4 \times 10^{-9}$ ; they closely equal the relative uncertainty observed in the realization of the previous definition of the metre (1960) and can be characterized by a relative standard deviation of  $1.3 \times 10^{-9}$ .

[According to this definition, the standard radiation had a wavelength of

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{Kr}} &= (1/1\ 650\ 763.73) \text{ m} \\ &= 605\ 780\ 210.6 \text{ fm} \end{aligned}$$

with a relative uncertainty, estimated at the time, of  $\pm 1 \times 10^{-8}$ .]

### Annotated bibliography

- [1] EVENSON, K. M., WELLS, J. S., PETERSEN, F. R., DANIELSON, B. L., DAY, G. W., BARGER, R. L. and HALL, J. L., Speed of light from direct frequency and wavelength measurements of the methane-stabilized laser. *Phys. Rev. Lett.*, **29**, No. 19, 1972, pp. 1346-1349.
- [2] BLANEY, T. G., EDWARDS, G. J., JOLLIFFE, B. W., KNIGHT, D. J. E. and WOODS, P. T., Absolute frequencies of the methane-stabilized He-Ne laser (3.39  $\mu\text{m}$ ) and the CO<sub>2</sub>, R(32) stabilized laser (10.17  $\mu\text{m}$ ). *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **9**, 1976, pp. 1323-1330.
- [3] DOMNIN, Y. S., KOSHELJAEVSKY, N. B., TATARENKOV, V. M. and SHUMJATSKY, P. S., Precise frequency measurements in submillimeter and infrared region. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM 29**, No. 4, 1980, pp. 264-267.
- [4] BAIRD, K. M., SMITH, D. S. and WHITFORD, B. G., Confirmation of the currently accepted value 299 792 458 metres per second for the speed of light. *Opt. Commun.*, **31**, No. 3, 1979, pp. 367-368.
- [5] KNIGHT, D. J. E., EDWARDS, G. J., PEARCE, P. R. and CROSS, N. R., Measurement of the frequency of the 3.39  $\mu\text{m}$  methane-stabilized laser to  $\pm 3$  parts in  $10^{11}$ . *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM 29**, No. 4, 1980, pp. 257-264.
- [6] CLAIRON, A., DAHMANI, B. and RUTMAN, J., Accurate absolute frequency measurements on stabilized CO<sub>2</sub> and He-Ne infrared lasers. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM 29**, No. 4, 1980, pp. 268-272.
- [7] DOMNIN, Y. S., KOSHELJAEVSKY, N. B., TATARENKOV, V. M. and SHUMJATSKY, P. S., Measurement of the frequency of a He-Ne/CH<sub>4</sub> laser. *JETP Letters*, **34**, No. 4, 1981, pp. 167-170.
- [8] Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences (France), Rapport d'activité, 1981, pp. 24-31.
- [9] CHEBOTAYEV, V. P., Optical time scale. *J. Phys. (Paris)*, Colloque C8, **42**, suppl. au N° 12, 1981, pp. C8-505-512.
- [10] WHITFORD, B. G. and SMITH, D. S., Frequency of the methane-stabilized He-Ne laser at 3.39  $\mu\text{m}$  measured relative to the 10.17  $\mu\text{m}$  R(32) transition of the CO<sub>2</sub> laser. *Opt. Commun.*, **20**, No. 2, 1977, pp. 280-283.
- [11] NBS measurement of frequencies in the visible and near I.R. Document CCDM/82-30.

This document gives the value 520 206 808 547 kHz; this value has been reduced by 12 kHz at the request of the delegates of NBS at the 7th session of the CCDM.

- [12] NPL, Laser wavelength measurements. Document CCDM/82-34.

In this document, all the values must be corrected by  $3.5 \times 10^{-11}$  in relative value; this stems from the fact that the frequency of the laser at

$\lambda \approx 633 \text{ nm}$  must be increased because the temperature of the cold finger of the iodine cell was  $16^\circ\text{C}$  instead of  $15^\circ\text{C}$ , the agreed reference temperature for this type of laser.

It has been agreed that the indicated uncertainties correspond to one standard deviation.

- [13] LAYER, H. P., DESLATTES, R. D. and SCHWEITZER, W. G., Laser wavelength comparison by high resolution interferometry. *Applied Optics*, **15**, No. 3, 1976, pp. 734-743.

This paper gives

$$\lambda_{\text{CH}_4}/\lambda_{1271_2, \text{k}, 4^\circ\text{C}} = 5.359\,049\,260\,6 \times (1 \pm 2 \times 10^{-10}).$$

Taking account of the measurements made at CSIRO and at NPL, one finds

$$f_{1271_2, \text{i}, 15^\circ\text{C}} - f_{1271_2, \text{k}, 4^\circ\text{C}} = (-96\,050 \pm 50) \text{ kHz},$$

from which

$$(f_{1271_2, \text{i}, 15^\circ\text{C}} - f_{1271_2, \text{k}, 4^\circ\text{C}})/f_{\text{CH}_4} = (-1.086\,83 \pm 0.000\,58) \times 10^{-6}.$$

- [14] BÖNSCH, G., Wavelength comparison between methane and iodine stabilized He-Ne lasers. Document CCDM/82-41.

- [15] NPL, 1979. Unpublished result communicated by W. R. C. Rowley :

$$\lambda_{\text{CH}_4}/\lambda_{1271_2, \text{d}, 18^\circ\text{C}} = 5.359\,050\,040\,4 \times (1 \pm 1.5 \times 10^{-9}).$$

Taking account of the measurements made during the international comparisons, one finds

$$f_{1271_2, \text{i}, 15^\circ\text{C}} - f_{1271_2, \text{d}, 18^\circ\text{C}} = (-165\,074 \pm 4) \text{ kHz},$$

from which

$$(f_{1271_2, \text{i}, 15^\circ\text{C}} - f_{1271_2, \text{d}, 18^\circ\text{C}})/f_{\text{CH}_4} = (-1.867\,86 \pm 0.000\,05) \times 10^{-6}.$$

- [16] BÖNSCH, G., Wavelength comparisons. Document CCDM/79-20.

- [17] KAPRALOV, V. P., MALYSHEV, G. M., PAVLOV, P. A., PRIVALOV, V. E., FOFANOV, Y. A. and ETSIN, I. S., Measurement of the wavelength ratio of lasers stabilized by saturated absorption in iodine and methane. *Opt. Spectrosc. (USSR)*, **50**, 1981, pp. 34-37.

This paper gives

$$\lambda_{\text{CH}_4}/\lambda_{1271_2, \text{d}} = 5.359\,050\,033 \pm 3.55 \times 10^{-9}$$

(for a confidence level of 0.95).

From

$$f_{1271_2, \text{i}} - f_{1271_2, \text{d}} = (-165\,114 \pm 2) \text{ kHz (Document CCDM/82-29)}$$

one calculates

$$(f_{1271_2, \text{i}} - f_{1271_2, \text{d}})/f_{\text{CH}_4} = (-1.868\,31 \pm 0.000\,02) \times 10^{-6}.$$

- [18] BLANEY, T. G., BRADLEY, C. C., EDWARDS, G. J., KNIGHT, D. J. E., WOODS, P. T. and JOLLIFFE, B. W., Absolute frequency measurement of the R(12) transition of CO<sub>2</sub> at 9.3 μm. *Nature*, **244**, No. 5417, 1973, p. 504.

This paper gives

$$f_{\text{CO}_2} = (32\,176\,079\,482 \pm 28) \text{ kHz.}$$

- BLANEY, T. G., BRADLEY, C. C., EDWARDS, G. J., JOLLIFFE B. W., KNIGHT, D. J. E., ROWLEY, W. R. C., SHOTTON, K. C. and WOODS, P. T., Measurement of the speed of light : I. Introduction and frequency measurement of a carbon dioxide laser. *Proc. R. Soc. Lond. A.*, **355**, 1977, pp. 61-88.

This paper corrects the previous value as follows by giving the frequency at the centre of the line; the uncertainty has also been reevaluated :

$$f_{\text{CO}_2} = (32\,176\,079\,472 \pm 14) \text{ kHz.}$$

Nevertheless, for the determination of  $f_i$  from the  $f_i/f_{\text{CO}_2}$  ratio measured at the NPL, at the request of the delegate of this laboratory one must take

$$f_{\text{CO}_2} = (32\,176\,079\,482 \pm 14) \text{ kHz.}$$

- WOODS, P. T., SHOTTON, K. C. and ROWLEY, W. R. C., Frequency determination of visible laser light by interferometric comparison with upconverted CO<sub>2</sub> laser radiation. *Applied Optics*, **17**, 1978, pp. 1048-1054.

This paper gives

$$f_{i^{271},d,18^\circ\text{C}}/f_{\text{CO}_2} = 14.719\,393\,666 \times (1 \pm 0.4 \times 10^{-9}).$$

With the value of

$$f_{i^{271},d,18^\circ\text{C}} - f_{i^{271},i,15^\circ\text{C}} \text{ given in [15],}$$

one calculates

$$(f_{i^{271},i,15^\circ\text{C}} - f_{i^{271},d,18^\circ\text{C}})/f_{\text{CO}_2} = (-5.130\,33 \pm 0.000\,12) \times 10^{-6}.$$

- [19] JOLLIFFE, B. W., ROWLEY, W. R. C., SHOTTON, K. C., WALLARD, A. J. and WOODS, P. T., Accurate wavelength measurement on up-converted CO<sub>2</sub> laser radiation. *Nature*, **251**, No. 5470, 1974, pp. 46-47.

This paper gives the value

$$\lambda_{\text{CO}_2} = 9\,317\,246\,348 \text{ fm,}$$

obtained by the measurement of the ratio  $\lambda_{\text{CO}_2}/\lambda_{i^{271},d,18^\circ\text{C}}$  and using for  $\lambda_{i^{271},d,18^\circ\text{C}}$  the value 632 991 178.3 fm, deduced from the recommended value for the component i : 632 991 399 fm (*Procès-Verbaux CIPM*, 62<sup>e</sup> session, 1973, p. 112) and from the value

$$f_{i^{271},d} - f_{i^{271},i} = 165\,114 \text{ kHz (Document CCDM/82-29).}$$

One can then recalculate the ratio

$$f_{1,2,d,18^\circ\text{C}}/f_{\text{CO}_2} = \lambda_{\text{CO}_2}/\lambda_{1,2,d,18^\circ\text{C}} = 14.719\,393\,678;$$

the indicated uncertainty for the measured value of this ratio is  $1.4 \times 10^{-9}$ .

To arrive at the component  $i$ , one completes the calculation as previously in [18].

- [20] NBS measurement of frequencies in the visible and near I.R. Document CCDM/82-30.

This document gives the value 473 612 214 789 kHz; by a letter of February 1, 1983, the NBS has modified this value to 473 612 214 827 kHz (to be published in *Optics Letters*, **8**, 1983); the uncertainty has been increased to 76 kHz (standard deviation).

- [21] BENNETT, S. J., CÉREZ, P., HAMON, J. and CHARTIER, A., Wavelength of a helium-neon laser stabilized by saturated absorption in iodine at 612 nm. *Metrologia*, **15**, 1979, p. 125.

This paper gives the value

$$\lambda'_i = 611\,970\,458.6 \text{ fm},$$

obtained by the measurement of the ratio  $\lambda'_i/\lambda_i$  and by using for  $\lambda_i$  the recommended value. One can then recalculate the ratio

$$f'_i/f_i = \lambda_i/\lambda'_i = 1.034\,349\,599\,89.$$

The indicated relative uncertainty for the measured value of this ratio is  $3 \times 10^{-10}$  (standard deviation).

One accepts

$$f'_0 - f'_i = (-249\,600 \pm 40) \text{ kHz (Document CCDM/82-29)},$$

from which

$$(f'_0 - f'_i)/f_i = (-0.527\,01 \pm 0.000\,08) \times 10^{-6}.$$

- [22] *Procès-Verbaux CIPM*, 68<sup>e</sup> session, 1979, p. 33.

The reference radiation is the same as above; one found

$$\lambda'_i = 611\,970\,459.0 \text{ fm},$$

which gives

$$f'_i/f_i = 1.034\,349\,599\,22;$$

the indicated relative uncertainty for the measured value of this ratio is  $3.6 \times 10^{-10}$  (standard deviation).

- [23] BÖNSCH, G., Wellenlängenvergleich von  $J_2$ -stabilisierten He-Ne-Lasern mit 612 nm und 633 nm Wellenlänge. *PTB-Jahresbericht*, 1980, p. 139.

This document gives the ratio

$$f_i/f'_0 = \lambda'_0/\lambda_i = 0.966\,791\,605\,0 \times (1 \pm 3.4 \times 10^{-10}).$$

- [24] Document CCDM/82-19a and *Procès-Verbaux CIPM*, 71<sup>e</sup> session, 1982 (to be published).

This document gives :

$$\lambda_d/\lambda'_o = f'_o/f_d = 1.034\ 348\ 711\ 3 \times (1 \pm 2.1 \times 10^{-10}).$$

One can calculate  $f'_o/f_i$  by the relation

$$f'_o/f_i = [1 - (f_i - f_d)/f_i] \times f'_o/f_d$$

with

$$f_i - f_d = -165\ 114\ \text{kHz (Document CCDM/82-29)}$$

and

$$f_i = 473\ 612\ 214.8\ \text{MHz.}$$

- [25] *Procès-Verbaux CIPM*, 68<sup>e</sup> session, 1979, p. 32.

Given the value  $\lambda_{a_3} = 514\ 673\ 466.9\ \text{fm}$ , obtained from the recommended value of  $\lambda_i$ , one may recalculate the ratio  $f_i/f_{a_3} = \lambda_{a_3}/\lambda_i$ ; the indicated relative uncertainty for the value of this ratio is  $4.3 \times 10^{-10}$  (standard deviation).

- [26] BÖNSCH, G., Wavelength comparisons. Document CCDM/79-20.

This document gives

$$\lambda_{a_3}/\lambda_i = 0.813\ 081\ 295\ 4 \times (1 \pm 5 \times 10^{-10}).$$

- [27] Document CCDM/82-19a and *Procès-Verbaux CIPM*, 71<sup>e</sup> session, 1982 (to be published).

This document gives

$$\lambda_{a_3}/\lambda_d = f_d/f_{a_3} = 0.813\ 081\ 579\ 7 \times (1 \pm 2.9 \times 10^{-10}).$$

One can calculate  $f_{a_3}/f_i$  by the relation

$$f_{a_3}/f_i = [1 - (f_i - f_d)/f_i] / (f_d/f_{a_3})$$

with

$$f_i - f_d = -165\ 114\ \text{kHz (Document CCDM/82-29)}$$

and

$$f_i = 473\ 612\ 214.8\ \text{MHz.}$$

- [28] *Procès-Verbaux CIPM*, 49<sup>e</sup> session, 1960, pp. 71-72.

- [29] *Comptes Rendus 11<sup>e</sup> CGPM*, 1960, p. 85.

- [30] *CCDM*, 5<sup>e</sup> session, 1973, p. M 15.

*Note of the BIPM.* This publication gives  $(\lambda_i)_{Kr} = 632\ 991\ 398.5\ \text{fm}$ . Further measurements have been made at IMGC (Conference AMCO, 1975, pp. 431-435), at NRLM (*Metrologia*, 14, 1978, pp. 47-51 and Doc. CCDM/79-3), at IMM (Doc. CCDM/78-12), at CSIRO (Doc. CCDM/78-3), at NPRL (*S. Afr. J. Phys.*, 4, 1981, pp. 1-4). Taking into account these new results, the mean value of  $(\lambda_i)_{Kr}$  would differ from the above-mentioned value by less than the estimated uncertainty.

APPENDIX M 5

**Frequency intervals between hyperfine components  
of absorption lines of iodine**

The notations of the hyperfine components are those utilized in the quoted bibliography; the systematic notation proposed in the document CCDM/82-32 has also been indicated.

The classification of the hyperfine components given in references [26] and [29] has been completed taking into account some calculations made at the BIPM (Rapport BIPM-83/5 ).

The values adopted for the frequency intervals are the weighted means of the values quoted in the bibliography.

For the values of the uncertainties, one has taken into account :

- the uncertainties given by the authors,
- the spread in the different determinations of a single component,
- and the effect of any perturbing components.

TABLE I

(unit : MHz;  $s$  : estimated standard deviation)

$\lambda = 515 \text{ nm}, {}^{127}\text{I}_2$   
P(13) 43-0

Reference : component  $a_3, f = 582\,490\,603.6 \text{ MHz}$  [1]

Component	$f(a_n) - f(a_3)$	$s$	Component	$f(a_n) - f(a_3)$	$s$
$a_1$	- 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

Ref. [2] to [5]

TABLE 2

(unit : MHz;  $s$  : estimated standard deviation)

$$\lambda = 515 \text{ nm}, {}^{127}\text{I}_2$$

$$\mathbf{R(15) 43-0}$$

- References  $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ component } a_3, \text{ P(13) 43-0, } f = 582\,490\,603.6 \text{ MHz [1]} \\ \bullet f(a_1) - f(a_3) = [-131.770 \pm 0.001] \text{ MHz, (Table 1)} \\ \bullet f(b_1) - f(a_1) = [283.835 \pm 0,005] \text{ MHz [3] [6]} \end{array} \right.$

Component	$f(b_n) - f(b_1)$	$s$	Component	$f(b_n) - f(b_1)$	$s$
$b_1$	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

Ref. [3], [4], [6]

TABLE 3

(unit : MHz;  $s$  : estimated standard deviation)

$$\lambda = 515 \text{ nm}, {}^{127}\text{I}_2$$

$$\mathbf{R(98) 58-1}$$

- References  $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ component } a_3, \text{ P(13) 43-0, } f = 582\,490\,603.6 \text{ MHz [1]} \\ \bullet f(d_6) - f(a_3) = [-2\,100 \pm 1] \text{ MHz [7]} \end{array} \right.$

Component	$f(d_n) - f(d_6)$	$s$	Component	$f(d_n) - f(d_6)$	$s$
$d_1$ 1	- 413.488	0.005	$d_8$ 8	200.478	0.005
$d_2$ 2	- 359.553	0.005	$d_9$ 9	225.980	0.005
$d_3$ 3	- 194.521	0.005	$d_{10}$ 10	253	1
$d_4$ 4	- 159.158	0.005	$d_{11}$ 11	254	1
$d_5$ 5	- 105.769	0.005	$d_{12}$ 12	314.131	0.005
$d_6$ 6	0	—	$d_{13}$ 13	426.691	0.005
$d_7$ 7	172.200	0.005	$d_{14}$ 14	481.574	0.005
			$d_{15}$ 15	510.246	0.005

Ref. [4], [6], [7]

TABLE 4

(unit : MHz;  $s$  : estimated standard deviation)

$$\lambda = 576 \text{ nm}, {}^{127}\text{I}_2$$

**P(62) 17-1**

Reference : component o ( $a_1$ ),  $f = 520\,206\,808.51$  MHz [1]

Component	$f(a_n) - f(o)$	$s$	Component	$f(a_n) - f(o)$	$s$
$a_1$ o	0	—	$a_6$ j	418.7	1.0
$a_2$ n	275.5	1.0	$a_7$ i	430.1	1.0
$a_3$ m	287.3	1.0	$a_8$ h	438.7	1.0
$a_4$ l	293.5	1.0	$a_9$ g	452.0	1.0
$a_5$ k	306.6	1.0	$a_{10}$ f	579.4	1.0

Ref. [8]

TABLE 5

(unit : MHz;  $s$  : estimated standard deviation)

$$\lambda = 612 \text{ nm}, {}^{127}\text{I}_2$$

**R(47) 9-2**

Reference : component o ( $a_7$ ),  $f = 489\,880\,355.1$  MHz [1]

Component	$f(a_n) - f(o)$	$s$	Component	$f(a_n) - f(o)$	$s$
$a_1$ u	— 357.15	0.08	$a_{11}$ k	119.12	0.05
$a_2$ t	— 333.99	0.05	$a_{12}$ j	219.64	0.05
$a_3$ s	— 312.5	0.3	$a_{13}$ i	249.63	0.10
$a_4$ r	— 86.18	0.10	$a_{14}$ h	284.36	0.10
$a_5$ q	— 47.30	0.05	$a_{15}$ g	358.35	0.20
$a_6$ p	— 36.84	0.10	$a_{16}$ f	384.76	0.20
$a_7$ o	0	—	$a_{17}$ e	403.84	0.20
$a_8$ n	81.46	0.10	$a_{18}$ d	430.04	0.10
$a_9$ m	99.13	0.10	$a_{19}$ c	527.20	0.10
$a_{10}$ l	107.52	0.05	$a_{20}$ b	539.32	0.10
			$a_{21}$ a	555.23	0.20

Ref. [9], [10], [11]

TABLE 6

(unit : MHz;  $s$  : estimated standard deviation)

$$\lambda = 612 \text{ nm}, {}^{129}\text{I}_2$$

$$\text{P(110) 10-2}$$

Reference : component o ( $a_7$ ), R(47) 9-2,  ${}^{127}\text{I}_2$ ,  
 $f = 489\,880\,355.1$  MHz [1]

Component	$f(a_n) - f(o, {}^{127}\text{I}_2)$	$s$	Component	$f(a_n) - f(o, {}^{127}\text{I}_2)$	$s$		
$a_1$	$b'$	- 376.29	0.05	$a_{15}$	$n$	1.61	0.20
$a_2$	$a'$	- 244.76	0.10	$a_{16}$	$m$	10.63	0.15
$a_3$	$z$	- 230.79	0.20	$a_{17}$	$l$	15.82	0.20
$a_4$	$y$	- 229.40	0.20	$a_{18}$	$k$	25.32	0.10
$a_5$	$x$	- 216.10	0.05	$a_{19}$	$j$	49.44	0.15
$a_6$	$w$	- 149.37	0.10	$a_{20}$	$i$	54.66	0.20
$a_7$	$v$	- 134.68	0.10	$a_{21}$	$h$	69.02	0.10
$a_8$	$u$	- 130.98	0.10	$a_{22}$	$g$	74.47	0.15
$a_9$	$t$	- 116.67	0.05	$a_{23}$	$f$	110.60	0.10
$a_{10}$	$s$	- 96.26	0.20	$a_{24}$	$e$	153.09	0.20
$a_{11}$	$r$	- 90.70	0.20	$a_{25}$	$d$	154.70	0.20
$a_{12}$	$q$	- 84.12	0.20	$a_{26}$	$c$	163.98	0.20
$a_{13}$	$p$	- 77.79	0.20	$a_{27}$	$b$	166.22	0.20
$a_{14}$	$o$	- 72.70	0.20	$a_{28}$	$a$	208.29	0.10

Ref. [10], [12], [13]

TABLE 7

(unit : MHz;  $s$  : estimated standard deviation)

$$\lambda = 612 \text{ nm}, {}^{129}\text{I}_2$$

$$\text{R(113) 14-4}$$

Reference : component o ( $a_7$ ), R(47) 9-2,  ${}^{127}\text{I}_2$ ,  
 $f = 489\,880\,355.1$  MHz [1]

Component	$f(b_n) - f(o, {}^{127}\text{I}_2)$	$s$	Component	$f(b_n) - f(o, {}^{127}\text{I}_2)$	$s$		
$b_{19}$	$r$	- 410.4	0.3	$b_{28}$	$i$	- 289.4	0.5
$b_{20}$	$q$	- 390.0	0.3	$b_{29}$	$h$	- 273.1	0.3
$b_{21}$	$p$	- 383.9	0.5	$b_{30}$	$g$	- 255.7	0.5
$b_{22}$	$o$	- 362.8	0.3	$b_{31}$	$f$	- 247	5.0
$b_{23}$	$n$	- 352.9	0.3	$b_{32}$	$e$	- 237	5.0
$b_{24}$	$m$	- 346.4	0.3	$b_{33}$	$d$	- 223	5.0
$b_{25}$	$l$	- 330.0	0.3	$b_{34}$	$c$	- 198.6	0.3
$b_{26}$	$k$	- 324.9	0.3	$b_{35}$	$b$	- 193.1	0.3
$b_{27}$	$j$	- 304.7	0.3	$b_{36}$	$a$	- 187.0	0.3

Ref. [12], [13]

TABLE 8

(unit : MHz;  $s$  : estimated standard deviation)

$$\lambda = 633 \text{ nm}, {}^{127}\text{I}_2$$

$$\mathbf{R(127) 11-5}$$

Reference : component  $i$  ( $a_{13}$ ),  $f = 473\ 612\ 214.8$  MHz [1]

Component	$f(a_n)-f(i)$	$s$	Component	$f(a_n)-f(i)$	$s$
$a_2$ 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	- 320.6	0.1	$a_{14}$ h	21.939	0.005
$a_5$ q	- 292.7	0.5	$a_{15}$ g	125.694	0.005
$a_6$ p	- 290.3	0.5	$a_{16}$ f	138.892	0.005
$a_7$ o	- 263.0	0.1	$a_{17}$ 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

Ref. [14] to [22]

TABLE 9

(unit : MHz;  $s$  : estimated standard deviation)

$$\lambda = 633 \text{ nm}, {}^{127}\text{I}_2$$

$$\mathbf{P(33) 6-3}$$

References { • component  $i$  ( $a_{13}$ ),  $\mathbf{R(127) 11-5}$ ,  $f = 473\ 612\ 214.8$  MHz [1]  
 •  $f(b_{21})-f(i, \mathbf{R(127) 11-5}) = [- 393.5 \pm 0.1]$  MHz [22]

Component	$f(b_n)-f(b_{21})$	$s$	Component	$f(b_n)-f(b_{21})$	$s$
$b_1$ u	- 915.7	0.5	$b_{11}$ k	- 435.0	0.5
$b_2$ t	- 888.3	0.5	$b_{12}$ j	- 347.3	0.2
$b_3$ s	- 863.0	0.5	$b_{13}$ i	- 310.2	0.2
$b_4$ r	- 655.1	0.5	$b_{14}$ h	- 263.5	0.2
$b_5$ q	- 605.5	0.5	$b_{15}$ g	- 214.5	0.2
$b_6$ p	- 589.0	0.5	$b_{16}$ f	- 179.2	0.2
$b_7$ o	- 543.0	0.5	$b_{17}$ e	- 153.9	0.2
$b_8$ n	- 482.9	0.5	$b_{18}$ d	- 118.2	0.2
$b_9$ m	- 456.0	0.5	$b_{19}$ c	- 36.8	0.2
$b_{10}$ l	- 449.5	0.5	$b_{20}$ b	- 22.0	0.2
			$b_{21}$ a	0	—

Ref. [22], [23]

TABLE 10

(unit : MHz;  $s$  : estimated standard deviation)

$\lambda = 633 \text{ nm}, {}^{129}\text{I}_2$   
**P(54) 8-4**

References  $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ component } i(a_{13}), \text{ R(127) 11-5, } {}^{127}\text{I}_2, f = 473\,612\,214.8 \text{ MHz [1]} \\ \bullet f(k(a_{28})) - f(i, \text{ R(127) 11-5, } {}^{127}\text{I}_2) = [95.90 \pm 0.04] \text{ MHz [24, 25]} \end{array} \right.$

Component	$f(a_n) - f(k)$	$s$	Component	$f(a_n) - f(k)$	$s$
$a_2$ $z'$	- 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	$a_{23}$ $a'$	- 98.21	0.05
$a_{11}$ $q'$	- 298.2	1	$a_{24}$ $n_2$	- 56*	1
$a_{12}$ $p'$	- 293.1	1	$a_{25}$ $n_1$		
$a_{13}$ $o'$	- 289.7	1	$a_{26}$ $m_2$	- 43.1	0.5
$a_{14}$ $n'$	- 282.7	1	$a_{27}$ $m_1$	- 41.2	0.5
			$a_{28}$ $k$	0	-

Ref. [26] to [30]

\* also component  $m_8$  of P(33) 6-3,  ${}^{127}\text{I}{}^{129}\text{I}$ .

TABLE 11

(unit : MHz;  $s$  : estimated standard deviation)

$\lambda = 633 \text{ nm}$ ,  $^{129}\text{I}_2$   
**P(69) 12-6**

References  $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ component } i(a_{13}), \text{ R(127) 11-5, } ^{127}\text{I}_2, f=473\,612\,214.8 \text{ MHz [1]} \\ \bullet f(k, \text{ P(54) 8-4, } ^{129}\text{I}_2) - f(i, \text{ R(127) 11-5, } ^{127}\text{I}_2) \\ = [95.90 \pm 0.04] \text{ MHz [24, 25]} \end{array} \right.$

Component	$f(b_n) - f(k)$	$s$	Component	$f(b_n) - f(k)$	$s$		
$b_1$	$b'''$	99.09	0.10	$b_{20}$	$q'$	508	4
$b_2$	$a'''$	116.05	0.10	$b_{22}$	$o'$	535	4
$b_3$	$z''$	132.02	0.10	$b_{23}$	$n'$	538	4
$b_4$	$s''$	234.55	0.10	$b_{24}$	$m'$	547	5
$b_5$	$r''$	257.0	0.5	$b_{25}$	$l'$	561	4
$b_6$	$q''$	264.9	0.5	$b_{26}$	$k'$	565	4
$b_7$	$p''$	288.06	0.10	$b_{27}$	$j'$	582	4
$b_8$	$k''$	338	1	$b_{28}$	$i'$	598	5
$b_9$	$i''_1$	359	1	$b_{29}$	$h'$	616	5
$b_{10}$	$i''_2$			$b_{30}$	$g'$	628	5
$b_{11}$	$f''$	373.77	0.20	$b_{31}$	$f'$	640	5
$b_{12}$	$d''$	385	4	$b_{32}$	$e'$	652	4
$b_{13}$	$c''$	393	4	$b_{33}$	$d'$	665	3
$b_{14}$	$b''$	401	4	$b_{34}$	$c'$	692	2
$b_{15}$	$a''$	407	4	$b_{35}$	$b'$	697	2
$b_{16}$	$z'$	411	4	$b_{36}$	$a'$	705	2
$b_{17}$	$y'$	417	4				

Ref. [26], [29]

TABLE 12

(unit : MHz;  $s$  : estimated standard deviation)

$$\lambda = 633 \text{ nm}, {}^{129}\text{I}_2$$

$$\text{P(60) 8-4}$$

- References {
- component  $i(a_{13})$ , R(127) 11-5,  ${}^{127}\text{I}_2$ ,  $f = 473\,612\,214.8$  MHz [1]
  - $f(k, \text{P(54) 8-4}, {}^{129}\text{I}_2) - f(i, \text{R(127) 11-5}, {}^{127}\text{I}_2)$   
 $= [95.90 \pm 0.04]$  MHz [24, 25]

Component	$f(d_n) - f(k)$	$s$
$d_{23}$ A'	- 555	5
$d_{24}$ N }	- 511	2
$d_{25}$ N }		
$d_{26}$ M }	- 499	2
$d_{27}$ M }		
$d_{28}$ K	- 456	2

Ref. [26]

TABLE 13

(unit : MHz;  $s$  : estimated standard deviation)

$$\lambda = 633 \text{ nm}, {}^{129}\text{I}_2$$

$$\text{P(33) 6-3}$$

- References {
- component  $i(a_{13})$ , R(127) 11-5,  ${}^{127}\text{I}_2$ ,  $f = 473\,612\,214.8$  MHz [1]
  - $f(e_2) - f(i, \text{R(127) 11-5}, {}^{127}\text{I}_2) = [988.29 \pm 0.2]$  MHz [31, 32, 33]

Component	$f(e_n) - f(e_2)$	$s$	Component	$f(e_n) - f(e_2)$	$s$
$e_1$ A	- 19.81	0.05	$e_9$ I	239	2
$e_2$ B	0	—	$e_{10}$ J	249	2
$e_3$ C	17.83	0.03	$e_{11}$ K	260	2
$e_4$ D	102.58	0.05	$e_{12}$ L	269	3
$e_5$ E	141	2	$e_{13}$ M	273	4
$e_6$ F	157	2	$e_{14}$ N	287	4
$e_7$ G	191	2	$e_{15}$ O	293	5
$e_8$ H	208	2	$e_{16}$ P	295	5
			$e_{17}$ Q	306	6

Ref. [26], [31], [32]

TABLE 14

(unit : MHz;  $s$  : estimated standard deviation)

$\lambda = 633 \text{ nm}, {}^{127}\text{I}^{129}\text{I}$

**P(33) 6-3**

References  $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ component } i(a_{13}), \text{ R(127) 11-5, } {}^{127}\text{I}_2, f=473\,612\,214.8 \text{ MHz [1]} \\ \bullet f(k, \text{ P(54) 8-4, } {}^{129}\text{I}_2) - f(i, \text{ R(127) 11-5, } {}^{127}\text{I}_2) \\ = [95.90 \pm 0.04] \text{ MHz [24, 25]} \end{array} \right.$

Component	$f(m_n) - f(k)$	$s$	Component	$f(m_n) - f(k)$	$s$		
$m_1$	$m'$	- 254	3	$m_{26}$	$u''$	212.85	0.10
$m_2$	$l'$	- 233.71	0.10	$m_{27}$	$t''$	219.46	0.10
$m_3$	$k'$	- 226.14	0.10	$m_{28}$	$r''$	256.95	0.20
$m_4$	$j'$	- 207	1.5	$m_{29}$	$q''$	264.88	0.20
$m_5$	$b'$	- 117.79	0.10	$m_{30}$	$o''$	299.25	0.10
$m_6$	$p$	- 87.83	0.15	$m_{31}$	$n''$	312.46	0.10
$m_7$	$o$	- 78.2	0.5	$m_{32}$	$m''$	322.54	0.10
$m_8$	$n$	- 56 *	1	$m_{33}$	$l''$	333.14	0.10
$m_9$	$l$	- 17.52	0.10	$m_{34}$	$k_2''$	337.8	0.5
$m_{10}$	$j$	12.06	0.10	$m_{35}$	$k_1''$		
$m_{11}$	$i$	15.59	0.10	$m_{36}$	$j''$	345.07	0.10
$m_{12}$	$h$	33.16	0.10	$m_{37}$	$h''$	362.21	0.20
$m_{13}$	$g_2$	39.7	0.5	$m_{38}$	$g''$	369.79	0.15
$m_{14}$	$g_1$	41.3	0.5	$m_{39}$	$e''$	379	5
$m_{15}$	$f$	50.74	0.10	$m_{40}$	$d''$	385	4
$m_{16}$	$e$	54.06	0.10	$m_{41}$	$x'$	431	4
$m_{17}$	$d$	69.34	0.10	$m_{42}$	$w'$	445	4
$m_{18}$	$c$	75.08	0.10	$m_{43}$	$v'$	456	4
$m_{19}$	$b$	80.0	0.10	$m_{44}$	$u'$	478	4
$m_{20}$	$a$	95.01	0.10	$m_{45}$	$t'$	487	4
$m_{21}$	$y''$	160.75	0.05	$m_{46}$	$s'$	495	4
$m_{22}$	$x''$	199.52	0.10	$m_{47}$	$r'$	505	4
$m_{23}$	$w''$	205.08	0.15	$m_{48}$	$p'$	516	4
$m_{24}$	$v_2''$	207.9	0.5				
$m_{25}$	$v_1''$						

Ref. [21], [26], [29], [30]

\* also components  $a_{24}$  and  $a_{25}$  of P(54) 8-4,  ${}^{129}\text{I}_2$ .

### Bibliography

- [1] Recommendation M 2 (CCDM, 7th meeting, 1982).
- [2] HACKEL, L. A., CASLETON, K. H., KUKOLICH, S. G. and EZEKIEL, S., *Phys. Rev. Lett.*, **35**, 1975, pp. 568-571.
- [3] CAMY, G., Thesis, Université Paris-Nord, 1979.
- [4] BORDÉ, C. J., CAMY, G., DECOMPS, B., DESCOUBES, J.-P., *J. Phys.*, **42**, 1981, pp. 1393-1411.
- [5] SPIEWECK, F., GLÄSER, M., FOTH, H. J., European Conference on Atomic Physics, Apr. 6-10, 1981, Heidelberg. In : *Europhysics Conference Abstracts*, **5A**, Part I, pp. 325-326.
- [6] SPIEWECK, F., Private communication.
- [7] FOTH, H. J., SPIEWECK, F., *Chem. Phys. Lett.*, **65**, 1979, pp. 347-352.
- [8] BAIRD, K. M., EVENSON, K. M., HANES, G. R., JENNINGS, D. A., PETERSEN, F. R., *Opt. Lett.*, **4**, 1979, pp. 263-264.
- [9] CÉREZ, P., BENNETT, S. J., *Applied Optics*, **18**, 1979, pp. 1079-1083.
- [10] KEGUNG DSCHAO, GLÄSER, M., HELMCKE, J., *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-29**, 1980, pp. 354-357.
- [11] BERTINETTO, F., CORDIALE, P., PICOTTO, G. B., CHARTIER, J.-M., FELDER, R., GLÄSER, M., *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-32**, 1983, pp. 72-76.  
and FELDER, R., BERTINETTO, F., Rapport BIPM-82/4.
- [12] CIDDOR, P. E., BROWN, N., *Opt. Comm.*, **34**, 1980, pp. 53-56.
- [13] GLÄSER, M., KEGUNG DSCHAO, FOTH, H. J., *Opt. Comm.*, **38**, 1981, pp. 119-123.
- [14] ROWLEY, W. R. C., WALLARD, A. J., *J. Phys. E*, **6**, 1973, pp. 647-651.
- [15] HANES, G. R., BAIRD, K. M. and De REMIGIS, J., *Applied Optics*, **12**, 1973, pp. 1600-1605.
- [16] CÉREZ, P., BRILLET, A. and HARTMANN, F., *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-23**, 1974, pp. 526-528.
- [17] BAYER-HELMS, F., CHARTIER, J.-M., HELMCKE, J. and WALLARD, A. J., *PTB-Bericht*, **Me-17**, 1977, pp. 139-146.
- [18] BERTINETTO, F., REBAGLIA, B. I., *Euromas*, **77**, *IEE*, **152**, 1977, pp. 38-39.
- [19] TANAKA, K., SAKURAI, T. and KUROSAWA, T., *Japan J. Appl. Phys.*, **16**, 1977, pp. 2071-2072.
- [20] BLABLA, J., SMYDKE, J., CHARTIER, J.-M., GLÄSER, M., *Metrologia*, **19**, 1983, pp. 73-75.  
and Document CCDM/82-26.
- [21] Document CCDM/82-19a (Means of measurements made during the international comparisons between the BIPM and LHA, NPL, PTB, IMGC, INM, NBS, IMM, NIM, CSMU; 1974-1981).
- [22] MORINAGA, A. and TANAKA, K., *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 1978, pp. 114-116.

- [23] HANES, G. R., LAPIERRE, J., BUNKER, P. R. and SCHOTTON, K. C., *J. Mol. Spectrosc.*, **39**, 1971, pp. 506-515.
  - [24] ROWLEY, W. R. C., Document CCDM/82-2 (measurements made at  $t_{1291_2} = t_{1271_2} = 8^\circ\text{C}$ ).
  - [25] CHARTIER, J.-M., Rapport BIPM-82/10 (measurements made at  $t_{1291_2} = t_{1271_2} = 8^\circ\text{C}$ ).
  - [26] GERLACH, R. W., Thesis, University Cleveland, 1975.
  - [27] KNOX, J. D. and YOH-HAN PAO, *Appl. Phys. Lett.*, **18**, 1971, pp. 360-362.
  - [28] TESIC, M. and YOH-HAN PAO, *J. Mol. Spectrosc.*, **57**, 1975, pp. 75-96.
  - [29] MAGYAR, J. A. and BROWN, N., *Metrologia*, **16**, 1980, pp. 63-68.
  - [30] *Procès-Verbaux CIPM*, **46**, 1978, p. 33.
  - [31] HELMCKE, J. and BAYER-HELMS, F., *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-23**, 1974, pp. 529-531 (measurements reduced to  $t_{1291_2} = t_{1271_2} = 2^\circ\text{C}$ ).
  - [32] To be published in *Procès-Verbaux du CIPM* (measurements made at  $t_{1291_2} = t_{1271_2} = 10^\circ\text{C}$ ).
  - [33] SCHWEITZER, Jr., W. G., KESSLER, Jr., E. G., DESLATTES, R. D., LAYER, H. P. and WHETSTONE, J. R., *Applied Optics*, **12**, 1973, pp. 2927-2938.
-

---

## TABLE DES MATIÈRES

---

### COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DU MÈTRE

#### 7<sup>e</sup> Session (1982)

---

	Pages
Notice historique sur les organes de la Convention du Mètre . . . . .	V
Liste des membres . . . . .	VII
Ordre du jour. . . . .	X
<b>Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par W. R. C. Rowley . . . . .</b>	<b>M 1</b>
Progrès effectués depuis 1979 sur :	
les mesures de fréquence (lasers asservis sur le méthane à $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ , lasers à gaz carbonique à $\lambda \approx 10 \mu\text{m}$ et lasers émettant dans le visible $\lambda = 576 \text{ nm}$ et $633 \text{ nm}$ ) . . . . .	3
les mesures de longueur d'onde (dans le visible et dans l'infrarouge). . . . .	3
la reproductibilité des lasers asservis (sur le méthane, sur l'iode). . . . .	4
Formulation d'une nouvelle définition: conclusions du Groupe de travail CCDM/CCU; discussions. Adoption de la Recommandation M 1 (1982) . . . . .	4
Spécification pour la mise en pratique. Exposé des deux moyens de la réalisation. Adoption de la Recommandation M 2 (1982) . . . . .	7
Liste des radiations recommandées. Projet d'établissement d'une liste d'écarts de fréquence entre diverses composantes hyperfines . . . . .	8
Tâches futures du BIPM et du CCDM. Nécessité pour le BIPM de participer aux travaux sur les lasers. Adoption de la Recommandation M 3 (1982) . . . . .	10
Comparaisons internationales de règle et d'étalons d'angle: état d'avancement . . . . .	11
Questions diverses: amélioration des mesures de longueur d'onde; jets atomiques . . . . .	11
Recommandations présentées au Comité International des Poids et Mesures :	
Note du BIPM . . . . .	13
Recommandation M 1 (1982) (Sur une nouvelle définition du mètre). . . . .	13
Recommandation M 2 (1982) (Mise en pratique de la définition du mètre). . . . .	15
Liste des radiations recommandées, 1982. . . . .	15
Recommandation M 3 (1982) (Travaux sur les lasers au BIPM) . . . . .	18

**Annexes :**

M 1. Documents de travail présentés à la 7 <sup>e</sup> Session du CCDM. . . . .	19
M 2. Consultation préalable par correspondance :	
M 2 A. Questionnaire sur les résultats obtenus depuis 1979 . . . . .	25
M 2 B. Résumé des réponses au questionnaire. . . . .	26
— Mesures de fréquence . . . . .	27
— Mesures de longueur d'onde . . . . .	33
— Reproductibilité . . . . .	36
— Étalons matériels . . . . .	39
M 3. Rapport du Groupe de travail <i>ad hoc</i> CCDM/CCU au Comité International des Poids et Mesures. . . . .	42
Points de vue sur la proposition d'une nouvelle définition . . . . .	43
Les diverses formulations d'une nouvelle définition du mètre . . . . .	44
Présentation des documents . . . . .	45
Discussion des documents soumis . . . . .	47
Suggestions concernant la formulation de la définition . . . . .	49
Recherche d'un consensus; synthèse et conclusions. . . . .	50
Résumé des conclusions . . . . .	51
Documents présentés aux membres du Groupe de travail CCDM/CCU . . . . .	52
M 4. Données utilisées pour établir la liste des radiations recommandées, 1982. Bibliographie commentée . . . . .	53
M 5. Intervalles de fréquence entre composantes hyperfines de raies d'absorption de l'iode . . . . .	65
<b>Notice for the reader of the English version. Avertissement au lecteur de la version anglaise. . . . .</b>	<b>77</b>
Historical Note. . . . .	79
Agenda. . . . .	82
<b>Report to the Comité International des Poids et Mesures, by W. R. C. Rowley . . . . .</b>	<b>83</b>
Progress made since 1979 on :	
measurements of the frequency (lasers stabilized with methane at $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$ , CO <sub>2</sub> lasers at $\lambda = 10 \mu\text{m}$ and visible stabilized-laser radiations ( $\lambda = 576 \text{ nm}$ and $633 \text{ nm}$ ) . . . . .	85
wavelength measurements (visible and infrared radiations). . . . .	85
reproducibility of lasers stabilized with methane or iodine. . . . .	86
Formulation of a new definition : conclusions of the CCDM/CCU Working Group; discussions. Recommendation M 1 (1982) is adopted . . . . .	86
Specification of the means of practical realization. Two general means of realization. Recommendation M 2 (1982) is adopted . . . . .	89
Establishment of the list of recommended radiations. Alternative transitions and their frequency differences . . . . .	90
Future tasks for the BIPM and CCDM. Necessary involvement of BIPM in laser work. Recommendation M 3 (1982) is adopted . . . . .	91
International comparisons of a line scale and angle standards . . . . .	92
Other matters . . . . .	93
Recommendations submitted to the CIPM :	
Note of BIPM . . . . .	94
Recommendation M 1 (1982) (On a new definition of the metre) . . . . .	94

Recommendation M 2 (1982) (Practical realization of the definition of the metre)	96
List of recommended radiations, 1982. . . . .	96
Recommendation M 3 (1982) (Work on lasers at the BIPM). . . . .	99

**Appendices :**

M 1. Working documents submitted to the CCDM at its 7th Meeting ( <i>see</i> page M 19)	
M 2. Preliminary questionnaire :	
M 2 A. Questionnaire sent by the BIPM. . . . .	101
M 2 B. Abstract of the replies to the questionnaire. . . . .	102
— Frequency measurements . . . . .	103
— Wavelength measurements . . . . .	109
— Reproducibility . . . . .	112
— Line, end and angle standards . . . . .	115
M 3. Report of the <i>ad hoc</i> CCDM/CCU Working Group to the CIPM . . . . .	118
Prospects for the proposal of a redefinition of the metre . . . . .	119
Alternative wordings for the redefinition of the metre . . . . .	120
Presentation of submitted documents . . . . .	121
Discussion of submitted documents . . . . .	123
Suggestions for modifications to the definition wordings . . . . .	125
Search for a consensus; synthesis and conclusion . . . . .	126
Summary of the conclusions . . . . .	127
Documents submitted to the members of the CCDM/CCU Working Group	128
M 4. Source data for the list of recommended radiations, 1982. Annotated bibliography. . . . .	129
M 5. Frequency intervals between hyperfine components of absorption lines of iodine . . . . .	140

---

IMPRIMERIE DURAND  
28600 LUISANT (FRANCE)

---

Dépôt légal : Imprimeur, 1983, n° 4436  
ISBN 92 822 2079 6

ACHEVÉ D'IMPRIMER : JUIN 1983

Imprimé en France