

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DU MÈTRE

SESSION DE 1979

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

COMITÉ CONSULTATIF

POUR

LA DÉFINITION DU MÈTRE

6^e SESSION — 1979

(6-8 juin)



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Pavillon de Breteuil, F-92310 SÈVRES, France

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

ISBN 92-822-2058-3

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 m²) du Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) mis à sa disposition par le Gouvernement français; son entretien est assuré à frais communs par les États membres de la Convention du Mètre (⁴).

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 au moins une fois tous les six 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 au moins une fois tous les deux 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 du Bureau International pour l'année 1979 est de l'ordre de 6 700 000 francs-or, soit environ 2 650 000 dollars U.S.

(⁴) Au 31 décembre 1979, quarante-cinq 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), 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 d'un délégué 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 sept :

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* (CCEMRI), créé en 1958. En 1969, ce Comité Consultatif a institué quatre sections: Section I (Rayons X et γ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie α); cette dernière Section a été dissoute en 1975, son domaine d'activité étant confié à la Section II.
7. Le *Comité Consultatif des Unités* (CCU), créé en 1964.

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 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

Vice-Président

P. HONTI

Président

J. V. DUNWORTH

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DU MÈTRE

Président

D. KIND, Membre 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 Métro-
logie [INM] du Conservatoire National des Arts et Métiers [CNAM].

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES [NRC], *Ottawa*.

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

JOINT INSTITUTE FOR LABORATORY ASTROPHYSICS [JILA], *Boulder*
(États-Unis d'Amérique).

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [NBS], *Washington*.

NATIONAL MEASUREMENT LABORATORY [NML], *Lindfield* (Australie).

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

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY [NRLM], *Tokyo*.

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*.

O R D R E D U J O U R
de la 6^e session

1. Examen des réponses au Questionnaire du BIPM d'octobre 1977 et à la lettre du 3 mars 1978.
 2. Exposés éventuels sur des résultats nouveaux concernant les sujets du Questionnaire.
 3. Mesures de longueur ; mesures d'angle :
 - a) Etalons secondaires : longueurs d'onde à recommander, exactitude.
 - b) Résultats de comparaisons internationales de mesures d'étalons de longueur à traits et à bouts. Peut-on améliorer ces étalons ?
Doit-on proposer de nouvelles comparaisons internationales ?
 - c) Comparaison internationale d'étalons d'angle ?
 4. Définition du mètre :
 - a) La Conférence Générale des Poids et Mesures de 1983 devra-t-elle proposer une nouvelle définition ?
 - b) Si oui, discussion sur les définitions possibles.
 - c) Nécessité d'élaborer des Recommandations pour la mise en pratique de la nouvelle définition. Travaux préalables nécessaires.
 - d) Etablissement du programme de travail et fixation d'un calendrier.
 5. Questions diverses.
-

RAPPORT

DU

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DU MÈTRE

(6^e Session — 1979)

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 sixième session au Pavillon de Breteuil, à Sèvres, les mercredi 6, jeudi 7 et vendredi 8 juin 1979.

Etaient présents :

D. KIND, membre du CIPM, président du CCDM.

Les délégués des laboratoires membres :

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

Joint Institute for Laboratory Astrophysics [JILA], Boulder (J.L. HALL).

National Bureau of Standards [NBS], Washington et Boulder (K.G. KESSLER, D. JENNINGS).

Institut de Métrologie D.I. Mendéléïev [IMM], Leningrad (Y.V. TARBEEV).

National Measurement Laboratory [NML], Lindfield (P. HARIHARAN).

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

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

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB],
Braunschweig (F. BAYER-HELMS, J. HELMCKE).
Bureau National de Métrologie, Paris : Institut
National de Métrologie [INM] du Conservatoire
National des Arts et Métiers [CNAM] (P. BOUCHARÉINE).

Le directeur du BIPM (P. GIACOMO).

Invités :

National Physical Research Laboratory [NPRL], Pretoria
(R. TURNER).
National Institute of Metrology [NIM], Pekin et
Chengdu (GUO YOUGUANG, CHU SHIYU).
Istituto di Metrologia G. Colonnetti [IMGC], Turin
(S. SARTORI).
Institut Métrologique Tchèqueoslovaque [CSMU],
Bratislava (J. BLABLA).

Observateur :

A. BRILLET (Laboratoire de l'Horloge Atomique), Orsay.

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 (BIPM).

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

Absent : Amt für Standardisierung, Messwesen und
Warenprüfung [ASMW], Berlin.

Le *Président* ouvre la session en accueillant les participants, en particulier les délégués qui assistent au Comité pour la première fois ainsi que ceux qui ont dû faire un long voyage.

Le *Président* rappelle la mémoire de U. Stille qui avait présidé la session précédente et qui est décédé en 1976 après une longue maladie ; une minute de silence est observée.

Mr Rowley (aidé de Mr Hamon comme secrétaire) est nommé rapporteur ; l'ordre du jour est approuvé.

PROGRÈS EFFECTUÉS DEPUIS 1973 SUR L'ASSERVISSEMENT
DES LASERS

Avant la réunion, les participants ont reçu une quantité considérable de renseignements détaillés portant sur les caractéristiques des lasers asservis et les mesures de leur fréquence ou de leur longueur d'onde. La plus grande partie de cette documentation avait été fournie par les membres du CCDM en réponse à un Questionnaire envoyé par le BIPM en octobre 1977 (Doc. 77-1). Le BIPM avait également préparé et diffusé aux participants un résumé des douze réponses à ce Questionnaire (Doc. 78-27). Dans le courant de 1979, une trentaine de documents donnant de nouveaux résultats ont été distribués soit avant, soit pendant la présente session.

De nombreux documents décrivent le fonctionnement des lasers à He-Ne asservis sur l'absorption saturée de l'iode à 633 nm*, pour lesquels on obtient une stabilité moyenne de 2 à 3 x 10^{-12**} pour des observations s'étendant sur des intervalles de temps de 10 secondes. On discute d'un certain nombre de facteurs affectant la reproductibilité de ces lasers et on examine dans le détail les résultats des recherches expérimentales. Des comparaisons faites entre le BIPM et d'autres laboratoires sur des lasers de construction différente, mais ayant des conditions de fonctionnement similaires, montrent que des reproductibilités de ± 2 x 10⁻¹¹ sont couramment obtenues. Il a été suggéré que l'on pouvait faire une extrapolation à partir des conditions normales de fonctionnement pour obtenir, avec une incertitude relative de 1 x 10⁻¹⁰, la fréquence non perturbée de la molécule utilisée comme référence pour l'asservissement (PTB, Doc. 78-10).

* Pour alléger le texte, on indiquera, ici, les valeurs des longueurs d'onde sans s'astreindre à écrire chaque fois λ .

** Pour la stabilité, la reproductibilité, l'exactitude ou l'incertitude des mesures, les nombres indiqués correspondent aux valeurs relatives.

Pour des lasers à He-Ne asservis sur l'absorption saturée du méthane à 3,39 μm , les stabilités indiquées sont comprises entre 1×10^{-13} et 6×10^{-12} pour des intervalles de temps de 1 seconde. Les reproductibilités obtenues lors d'une comparaison faite entre le BIPM et le NPL sont meilleures que $\pm 3 \times 10^{-11}$ (Doc. 79-12), alors qu'à la PTB des lasers ont donné une reproductibilité et une exactitude de $\pm 5 \times 10^{-12}$ (Doc. 78-10) ; l'IMM a fait état d'une reproductibilité de 1×10^{-14} (Doc. 78-12).

On a mentionné, pour le laser à CO_2 dans le domaine de 9 à 11 μm , des stabilités de $1,4 \times 10^{-9}$ (NRLM, Doc. 78-6a) et de 1×10^{-10} (NRC, Doc. 78-7b) pour des lasers asservis sur la fluorescence saturée de CO_2 . L'IMM a fait état d'une stabilité de 2×10^{-13} pour un intervalle de temps de 1 seconde avec asservissement sur l'hexafluorure de soufre et d'une reproductibilité de 2×10^{-11} pour des lasers asservis sur le tetroxyde d'osmium (Doc. 78-12). Egalement dans l'infra-rouge, le laser à He-Xe à 3,51 μm a été asservi sur H_2CO et l'on a obtenu au Tokyo Institute of Technology une stabilité de 1×10^{-12} pour des intervalles de temps de 10 secondes (Doc. 79-4).

Du point de vue de la métrologie pratique, la radiation visible à 515 nm du laser à argon ionisé asservi sur l'iode est très intéressante. On obtient une stabilité de 1×10^{-11} sur un intervalle de temps de 1 seconde dans un système à cellule externe avec une reproductibilité de $\pm 2 \times 10^{-11}$ et une exactitude de $\pm 5 \times 10^{-11}$ (PTB, Doc. 78-10). Au laboratoire de Physique des Lasers, Paris, un système plus complexe d'asservissement a permis d'obtenir une stabilité de 3×10^{-14} avec une reproductibilité d'environ $1,5 \times 10^{-12}$ (Doc. 78-8a). Le laser à He-Ne asservi sur l'absorption saturée de l'iode à 612 nm et à d'autres longueurs d'onde visibles semble constituer aussi une source très pratique et stable ; plusieurs laboratoires commencent des recherches dans cette voie. Une comparaison entre deux laboratoires a déjà montré une reproductibilité de 2×10^{-11} et il est probable qu'une reproductibilité d'au moins 1×10^{-12} sera obtenue avec un système à cellule externe (LHA, Doc. 79-19).

Plusieurs autres types de lasers asservis sont en cours d'étude mais pour lesquels on ne dispose pas encore de

résultats détaillés. Il y a, entre autres, le laser à mercure pompé optiquement, les lasers à dimères pompés optiquement et les lasers à colorants réglables. On étudie ou on envisage aussi d'autres modes d'asservissement faisant appel à des transitions à deux photons, à des techniques d'excitation de Ramsey à deux zones d'interaction, à des faisceaux moléculaires et à d'autres procédés d'affinement du profil de la raie et de réduction de la vitesse. Il est évident qu'on doit s'attendre à des améliorations de la stabilité et de la reproductibilité des étalons de longueur d'onde optique, que les sources dont on dispose actuellement seront améliorées et que de nouveaux dispositifs apparaîtront.

MESURES DE FRÉQUENCE ET DE LONGUEUR D'ONDE

On a mesuré, au NPL et au NRC, (Doc. 78-27) la fréquence de la radiation à 88 THz ($3,39 \mu\text{m}$) du laser à He-Ne asservi sur le méthane par rapport à la fréquence de la radiation du laser à CO_2 à 30 THz. Compte tenu des incertitudes de $\pm 1 \times 10^{-9}$ avec un niveau de confiance de 95 %, les résultats sont en excellent accord ; ils concordent aussi avec la valeur donnée par le NBS en 1973 : la dispersion totale de ces trois résultats n'est que de 2×10^{-10} . Ainsi, les nouveaux résultats confirment la valeur de la fréquence que l'on a utilisée en 1973 comme base de la valeur recommandée de la vitesse de la lumière.

Dans plusieurs laboratoires on entreprend d'autres mesures de fréquences optiques. Au NPL et à la PTB, des mesures de la chaîne des fréquences allant du césium au méthane (88 THz) sont en cours. Le NBS a réussi à mesurer les fréquences de la radiation du xénon à $2,03 \mu\text{m}$ et des radiations du laser à He-Ne à $1,52 \mu\text{m}$ et $1,15 \mu\text{m}$. En collaboration avec le NRC, il vient également de doubler, dans un cristal non linéaire, la fréquence de la radiation à $1,15 \mu\text{m}$ afin de mesurer les fréquences des composantes hyperfines de l'iode dans le visible à 520 THz (576 nm) (Doc. 79-6). Le NBS propose aussi une chaîne de synthèse de fréquences plus simple atteignant 576 nm qui devrait donner une mesure de fréquence très exacte. De plus, le NBS propose un procédé de

mélange de fréquences pour relier les radiations à 576 nm et à 633 nm du laser asservi sur l'iode. Au NRC, la possibilité de passage des basses fréquences à la fréquence du CO_2 en utilisant les combinaisons de quatre radiations du CO_2 a été démontrée. On espère pouvoir déterminer une fréquence du CO_2 avec une exactitude de 2×10^{-9} . Le NRC a aussi l'intention de mesurer la fréquence de la radiation du He-Ne à $1,15 \mu\text{m}$ en utilisant les radiations du Xe à $2,02 \mu\text{m}$ et $3,5 \mu\text{m}$ avec la radiation du laser à CO_2 , en générant des sommes et des différences de fréquences au moyen de cristaux non linéaires (Doc. 79-17).

En mesurant par une méthode interférométrique le rapport des longueurs d'onde des radiations du laser à CO_2 et du laser à 633 nm et en combinant ce rapport avec la fréquence mesurée du CO_2 , le NPL a déterminé la fréquence de l'une des composantes hyperfines de l'iode à 633 nm avec une incertitude de $\pm 6 \times 10^{-10}$ (Doc. 78-4). La valeur diffère de 13×10^{-10} (Doc. 78-20) d'une valeur fondée sur la mesure interférométrique du rapport des longueurs d'onde des radiations à $3,39 \mu\text{m}$ et à 633 nm effectuée au NBS avec la même incertitude* (Doc. 78-27). Le NPL a indiqué une autre valeur provisoire pour la fréquence visible de cette même composante déterminée à partir d'une mesure du rapport de sa longueur d'onde à celle de la radiation à $3,39 \mu\text{m}$. Cette valeur est inférieure de 2×10^{-9} en fréquence à celle du NPL mentionnée ci-dessus, avec une incertitude provisoirement estimée à 2×10^{-9} .

Trois laboratoires ont rendu compte de mesures de la longueur d'onde de la radiation du laser à He-Ne asservi sur l'iode à 633 nm par comparaison à celle de l'étalon du krypton 86 (NRLM, NML, IMM). Ces trois résultats (Doc. 78-27)

* Pour comparer ces deux valeurs, on a fait appel à la différence de fréquences $(^{129}\text{I}_2, k) - (^{127}\text{I}_2, i)$ entre les composantes hyperfines des différents isotopes de l'iode à 633 nm. Des mesures récentes faites au BIPM (Doc. 78-13a) donnent pour cette différence 95,762 1 MHz, plutôt que la valeur 96,039 9 MHz donnée dans l'Appendice au Rapport de 1973 du CCDM. L'écart entre ces valeurs est peut-être en partie dû aux conditions expérimentales différentes. Toutefois, si l'on tient compte de la valeur la plus faible (95,762 1 MHz), l'écart relatif de 13×10^{-10} indiqué plus haut est ramené à 7×10^{-10} .

sont en accord avec la valeur recommandée en 1973, avec une incertitude de $\pm 4 \times 10^{-9}$. De plus, la PTB a rendu compte de deux valeurs de la longueur d'onde de la radiation du laser asservi sur le méthane à 3,39 μm , mesurée directement par rapport à l'étalon du ^{86}Kr à l'aide d'un interféromètre de Michelson. Ces deux valeurs concordent avec celle qui a été recommandée en 1973 dans la limite des incertitudes indiquées (Doc. 78-27). Ultérieurement, le rapport des longueurs d'onde des radiations à 3,39 μm et 633 nm a été mesuré avec une incertitude relative de $\pm 2 \times 10^{-9}$ (Doc. 79-20).

Un certain nombre de mesures de longueur d'onde ont été faites avec la radiation du laser à argon ionisé asservi sur l'iode à 515 nm ; les résultats ont été rassemblés dans un rapport de la PTB (Doc. 79-21). Les quatre mesures de précision les plus récentes présentent un excellent accord entre elles. (Ces quatre valeurs sont celles que l'on trouve au bas du tableau du Doc. 79-21 ; elles proviennent des documents 79-12, 79-18, 79-20 et 79-21.) Dans les quatre cas, la longueur d'onde de référence est celle du laser à He-Ne asservi sur l'iode à 633 nm ; par rapport à cet étalon, les exactitudes de mesure de deux des résultats sont nettement meilleures que l'incertitude de $\pm 4 \times 10^{-9}$ de la valeur absolue (Doc. 79-12, 79-20).

Des mesures précises de longueur d'onde ont aussi été faites par le BIPM sur deux lasers à He-Ne asservis sur l'iode à 612 nm (Doc. 79-12). Ces mesures sont confirmées par des valeurs non publiées, de moindre exactitude, obtenues au LHA et au NPL.

Il est vraisemblable que ces deux radiations de lasers dans le visible seront de plus en plus utilisées en tant qu'étalons de longueur d'onde pour les mesures de longueur et les mesures spectroscopiques ; on a donc pensé qu'il serait judicieux de conseiller des valeurs pour les longueurs d'onde obtenues avec ces sources. Toutefois, eu égard à une éventuelle redéfinition du mètre dans les quelques années à venir et aux changements qui deviendraient par conséquent nécessaires dans la spécification des étalons de longueur d'onde, on a estimé inopportun pour le moment de recommander officiellement l'adoption de nouveaux étalons secondaires.

En conséquence, le CCDM s'est mis d'accord sur la déclaration suivante :

Le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre,

considérant les reproductibilités de fréquence obtenues avec des lasers asservis sur l'absorption saturée de l'iode, et les résultats des mesures des rapports de longueurs d'onde de ces lasers,

estime que la radiation $\lambda = 515$ nm du laser à argon asservi et la radiation $\lambda = 612$ nm du laser à He-Ne asservi peuvent être considérées comme longueurs d'onde de référence pour les mesures de longueur, en plus des radiations $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ et $\lambda = 633$ nm recommandées en 1973.

Pour la composante hyperfine* a_3 de la raie P(13) de la bande 43-0 de $^{127}\text{I}_2$, la dispersion des quatre mesures indépendantes de longueur d'onde les plus précises est de $\pm 1,0$ fm, de telle sorte que la valeur moyenne arrondie $\lambda(a_3) = 514\,673\,467$ fm présente en fait une incertitude de $\pm 4 \times 10^{-9}$ (± 2 fm) qui provient essentiellement de l'incertitude sur la réalisation du mètre au moyen du ^{86}Kr . De plus, deux des mesures donnent les valeurs 0,813 081 295 4 (avec une incertitude relative indiquée de 5×10^{-10}) et 0,813 081 295 8 (avec un écart-type statistique relatif σ_m de 4×10^{-10}) pour le rapport $\lambda(a_3)/\lambda(i)$ de la longueur d'onde de cette radiation à la composante hyperfine i de la raie R(127) de la bande 11-5 de $^{127}\text{I}_2$ à 633 nm. Ainsi, les résultats permettent de penser que l'incertitude relative du rapport moyen (0,813 081 295 6) est inférieure à 1×10^{-9} .

En ce qui concerne la raie R(47) de la bande 9-2 de $^{127}\text{I}_2$, on peut utiliser la longueur d'onde de la composante hyperfine o : $\lambda(o) = 611\,970\,771$ fm avec une incertitude relative de $\pm 4 \times 10^{-9}$ ($\pm 2,4$ fm). Cette valeur résulte de deux déterminations précises de la longueur d'onde de la composante hyperfine i qui concordent à 0,4 fm près et d'une mesure de la différence de fréquence entre les composantes o et i que l'on estime exacte à ± 50 kHz (0,06 fm) près.**

(On choisit de préférence la composante o car elle est moins perturbée par les composantes voisines.)

* La notation utilisée ici pour identifier la composante hyperfine de P(13), 43-0 est celle de L.A. Hackel *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 35, 1975, p. 568. Des valeurs numériques plus détaillées figurent dans le document CCDM/79-21.

** La différence de fréquence $f(i) - f(o) = (249,68 \pm 0,05)$ MHz a été déterminée au LHA (Orsay) et communiquée par A. Brilllet.

COMPARAISONS D'ÉTALONS À BOUTS, À TRAITS,
ET D'ÉTALONS D'ANGLES

Étalons à bouts

Le BIPM a rendu compte de mesures faites sur six étalons de forme cylindrique à bouts plans, en acier, de longueurs comprises entre 0,45 et 1,22 m, que le fabricant a fait circuler entre le BIPM, le NBS, le NPL et la PTB. Les résultats (Doc. 79-12) sont satisfaisants et concordants compte tenu des incertitudes des mesures indiquées par chaque laboratoire. On ne juge pas nécessaire que le CCRM organise une comparaison internationale d'étalons à bouts dans un proche avenir ; toutefois, il convient d'encourager des échanges d'étalons de ce type entre des petits groupes de laboratoires.

Étalons à traits

Deux étalons à traits ont circulé depuis juillet 1976 dans un certain nombre de laboratoires à la suite d'une proposition faite par le BIPM lors de la session du CCRM en 1973. Le BIPM a fait un rapport préliminaire sur les résultats obtenus jusqu'ici (Doc. 79-12). Après un premier circuit dans cinq laboratoires, les résultats obtenus sur l'une des règles ont été si peu satisfaisants que cette règle a été retirée de la comparaison. La circulation de l'autre règle dans le second groupe de laboratoires est actuellement en cours et l'on pense que le troisième et dernier circuit sera achevé dans le courant de 1981. Les résultats obtenus jusqu'ici sont assez décevants, même pour la meilleure règle. Il se peut que ce soit en partie dû à la mauvaise planéité de la règle, mais comme la dispersion des résultats est forte, même pour les courts intervalles de longueur, il semble que ce soit plutôt la qualité des traits et aussi les méthodes employées pour leur observation qui sont en cause.

Compte tenu de l'importance que les étalons à traits continuent à avoir pour la métrologie, on s'accorde pour dire que de nouvelles recherches dans ce domaine sont souhaitables, en particulier en ce qui concerne la qualité des traits et de la surface qui les porte. On propose que le BIPM

prenne contact avec les fabricants de règles à traits pour encourager les améliorations. Il a été suggéré que des règles de courte longueur pourraient suffire pour effectuer des comparaisons destinées à étudier la reproductibilité des mesures : des règles de ce type seraient plus faciles à transporter et demanderaient un moins grand nombre d'observations.

En conclusion, le CCDM adopte la *Recommandation M 1* (1979), p. M 15.

Étalons d'angle

On discute de l'opportunité, pour le CCDM, d'accepter la responsabilité de certaines études sur les étalons d'angle. On s'accorde pour dire que les étalons d'angle sont assez semblables aux cales étalons et que le CCDM pourrait inclure les mesures d'angle dans ses activités. On note que d'autres Organisations, telles que l'OIML, s'intéressent aussi à la normalisation de ces mesures, mais on convient que les laboratoires qui prennent part aux délibérations du CCDM doivent reconnaître que celui-ci, aidé du BIPM, est l'organisme concerné au premier chef par ce sujet. Il est recommandé que le BIPM se mette en rapport, si nécessaire, avec les autres Organisations intéressées.

On décide que la première opération à entreprendre concernant les étalons d'angle devrait être une comparaison internationale. Onze laboratoires expriment l'intérêt qu'ils portent à une telle comparaison : PTB, CSMU, NIM, NBS, NPL, NRC, NML, NRLM, IMM, IMG, Institut d'Optique de France. La comparaison sera organisée par le NRLM, le BIPM assurant le secrétariat, et très probablement à l'aide d'un polygone fourni par l'IMM.

DÉFINITION DU MÈTRE

En ce qui concerne le problème de savoir si une nouvelle définition du mètre était nécessaire et de quel type elle devrait être, les réponses au Questionnaire envoyé par le BIPM en octobre 1977 n'étaient pas concluantes. En vue d'une éventuelle proposition d'une nouvelle définition à soumettre

à la CGPM de 1979, le BIPM avait sollicité, d'une façon plus précise, l'avis du CCDM par une lettre - questionnaire envoyée en mars 1978. Les douze réponses reçues sont résumées dans le document 78-27. La majorité était en faveur d'une nouvelle définition qui ferait appel à la fréquence des radiations et à une valeur de la vitesse de la lumière adoptée par convention, permettant ainsi de déterminer longueurs d'onde et longueurs ; mais la majorité considérait qu'il était prématuré de proposer une nouvelle définition de ce type à la CGPM en 1979.

La nécessité de changer la définition du mètre dans un proche avenir ne provient pas principalement des besoins de la métrologie des longueurs ; en effet, pour ces besoins, la réalisation pratique du mètre au moyen du ^{86}Kr reste suffisamment précise et le laser asservi à 633 nm fournit un étalon secondaire bien adapté. Cette nécessité provient surtout du besoin de conserver l'intégrité de l'unité SI ; en plus de la réalisation du mètre au moyen du ^{86}Kr , il existe, en effet, à l'heure actuelle, trois autres valeurs de référence recommandées qui sont spécifiées avec la même exactitude. Ce sont : la vitesse de la lumière c , la longueur d'onde du laser asservi sur le méthane à 3,39 μm et la longueur d'onde à 633 nm du laser asservi sur l'iode. Les progrès des techniques pour la mesure des fréquences des radiations visibles et les reproductibilités des étalons lasers dans le visible sont tels

a) qu'il est reconnu que la reproductibilité des longueurs d'onde de ces étalons est plus de cent fois supérieure à la reproductibilité de l'étalon du ^{86}Kr ;

b) que l'on peut obtenir les valeurs de leur longueur d'onde de différentes façons, ce qui peut conduire à des résultats cohérents dans la limite des incertitudes actuelles de $\pm 4 \times 10^{-9}$ mais dont les écarts sont supérieurs aux incertitudes expérimentales.

Cela est dû au fait que l'on peut déterminer les valeurs des longueurs d'onde en mesurant leur rapport aux longueurs d'onde étalons de 3,39 μm ou 633 nm, ou bien à partir d'une mesure de fréquence et de la valeur recommandée pour la vitesse de la lumière ($\lambda = c/f$). Les résultats ne seront compatibles et cohérents que dans la limite de l'exactitude

relative des valeurs de référence ($\pm 4 \times 10^{-9}$), alors que les incertitudes de mesure peuvent être nettement meilleures. Cette situation risque de conduire à des incohérences et à une certaine confusion dans la spécification des longueurs d'onde des transitions spectroscopiques et des étalons de longueur d'onde. Des incohérences peuvent également apparaître entre des mesures de longueurs extraterrestres qui sont couramment fondées sur des observations de temps de vol et sur la valeur de la vitesse de la lumière, et des mesures terrestres qui sont généralement fondées sur des étalons de longueur d'onde.

Il ne peut être apporté de solution satisfaisante à ces problèmes qu'en changeant la définition du mètre de telle sorte que : 1° ou bien l'on choisit un étalon unique de longueur d'onde offrant une reproductibilité appropriée comme nouvel étalon primaire de longueur et de longueur d'onde, 2° ou bien l'on opte pour une formulation qui, en fait, fonde le mètre sur une valeur de c adoptée conventionnellement.

Le nombre de types de lasers asservis susceptibles d'être utilisés comme étalon primaire de longueur d'onde pour définir le mètre croît continuellement ; il est vraisemblable qu'aucun d'entre eux ne se révélera si nettement supérieur aux autres qu'on puisse espérer le voir demeurer longtemps sans rival. D'un autre côté, on peut penser qu'une nouvelle définition fondée sur une valeur fixe de c restera inchangée dans l'avenir prévisible. C'est la raison pour laquelle le choix se porte sur une définition de ce type. (Le problème d'une dispersion éventuelle de c a toujours beaucoup intéressé les physiciens, mais les estimations récentes laissent à penser que c est constant à 1×10^{-14} près pour toutes les radiations comprises entre les basses radiofréquences et les rayons X, de telle sorte qu'il est peu vraisemblable que la dispersion soit une cause de difficultés.)

Un facteur important fait hésiter le CCGM à recommander l'adoption immédiate d'une définition de ce type : l'exactitude avec laquelle on peut réaliser des étalons de longueur d'onde dans le visible au moyen d'un laser asservi, bien que plusieurs fois supérieure à l'exactitude que l'on peut atteindre avec le ^{86}Kr , est encore à l'heure actuelle quelque peu en deçà de la reproductibilité de la fréquence de ces

étalons. Est-il opportun de spécifier, comme une condition préalable à la proposition d'une nouvelle définition dans l'avenir, un certain niveau d'incertitude des mesures de fréquences optiques qu'il conviendrait d'atteindre ? On décide qu'il est préférable de ne pas préjuger des progrès qui pourraient intervenir dans les prochaines années, mais plutôt de laisser à une session ultérieure le soin de décider s'il convient ou non de recommander une nouvelle définition.

En même temps que l'on recommandera une nouvelle définition, il sera nécessaire de préciser la façon dont on pourra réaliser le mètre au laboratoire. Le CCDM devra indiquer quelles radiations de lasers asservis doivent être adoptées comme étalons de longueur d'onde et spécifier la valeur de leurs longueurs d'onde. Ces valeurs peuvent se rapporter soit à des transitions moléculaires non perturbées, soit à certaines conditions de fonctionnement spécifiées. On suggère que soit étudiée une dénomination appropriée pour de tels étalons de longueur d'onde. La définition du mètre elle-même ne fera probablement pas référence à une radiation monochromatique particulière, de telle sorte qu'il n'existera pas d'étalon primaire proprement dit. Il serait donc souhaitable de spécifier plusieurs radiations comme étalons de longueur d'onde.

Ayant décidé de ne faire aucune recommandation en vue de l'adoption d'une nouvelle définition du mètre en 1979, le CCDM envisage la possibilité de recommander une nouvelle définition avant la CGPM qui doit avoir lieu en 1983. En conséquence, il est proposé de réunir le CCDM en 1982 pour étudier à nouveau la situation. Entre-temps, il serait nécessaire que les laboratoires intensifient leurs recherches sur les lasers asservis et la détermination de la fréquence de ceux-ci afin que l'on puisse sélectionner des étalons de travail convenables pour la réalisation pratique du mètre selon la nouvelle définition qui sera proposée. On considère comme important que les laboratoires se communiquent tous les nouveaux résultats ou les nouvelles découvertes dès que possible afin de pouvoir les répéter ou les confirmer ; le BIPM est d'accord pour diffuser tous les renseignements qui lui seront envoyés.

On pense que le CIPM souhaitera étudier soigneusement la formulation de la nouvelle définition et qu'il convient de proposer dès maintenant une formulation afin qu'il reste suffisamment de temps pour qu'elle puisse être discutée et, si nécessaire, modifiée. Les formulations proposées peuvent se classer en deux types : celles qui définissent le mètre comme un nombre donné de longueurs d'onde d'une radiation et celles qui spécifient la distance parcourue par la lumière dans un intervalle de temps donné. Le premier type convient particulièrement pour réaliser le mètre dans les laboratoires d'étalonnage selon les méthodes pratiques habituelles, mais comme il fait appel au concept de la longueur d'onde, ce type de définition est plus difficile à comprendre pour les non-spécialistes. On reconnaît que la définition du mètre est importante pour tous les utilisateurs du SI et pas seulement pour ceux qui s'intéressent essentiellement aux mesures de longueur de haute précision. Après quelques discussions on se met d'accord pour dire que toute formulation suffisamment précise sera interprétée de façon correcte par les spécialistes et qu'il est par conséquent préférable d'avoir une formulation qui, tout en restant précise, soit suffisamment simple pour être largement comprise. On fait remarquer que le rôle du CCDM est de donner son avis sur la définition du mètre plutôt que de spécifier les constantes fondamentales de la physique ; il vaut donc mieux ne pas mentionner de façon explicite, dans la définition, que c est une constante dont la valeur est désormais fixée par définition. Enfin, on discute de la formulation la plus simple pour exprimer le concept de la propagation d'ondes planes illimitées et de surface infinie dans l'espace libre.

En conclusion, le CCDM adopte la *Recommandation* M 2 (1979), p. M 16.

DIVERS

Le NML (Doc. 79-2) fait remarquer qu'il devient difficile de se procurer dans le commerce le type de tube à plasma qui convient pour les lasers à He-Ne asservis sur l'iode. Le

CSMU (Doc. 79-25) signale qu'il peut peut-être apporter son aide sur ce point ; il est aussi mentionné qu'une société à Hambourg a fourni des tubes prototypes à la PTB (Helmcke).

*
* *

En clôturant la session, le *Président* remercie les participants pour leur contribution aux discussions, en particulier ceux qui ont apporté leur aide dans la rédaction des Recommandations, ainsi que le BIPM pour son hospitalité. Au nom de ses collègues, K.G. *Kessler* remercie le Président pour la façon dont il a dirigé la 6^e session du CCDM.

(Juin 1979)

R E C O M M A N D A T I O N S
du Comité Consultatif pour la Définition du Mètre
présentées
au Comité International des Poids et Mesures

Étalons à traits

RECOMMANDATION M 1 (1979)

Le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre,
reconnaisant que les étalons à traits gardent leur importance dans la métrologie des longueurs et

tenant compte des résultats de récentes mesures comparatives d'étalons à traits,

recommande

- que soient poursuivies les recherches pour améliorer la précision des étalons à traits, pour améliorer en particulier aussi bien la qualité des traits que la surface sur laquelle ils sont tracés,

- qu'une autre comparaison internationale soit entreprise lorsque l'on sera en possession d'étalons de meilleure qualité.

Sur une nouvelle définition du mètre

RECOMMANDATION M 2 (1979)

*Le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre,
considérant*

- que la définition actuelle du mètre ne permet pas une réalisation suffisamment précise pour satisfaire tous les besoins et devra donc être changée,

- que des radiations plus reproductibles et plus commodes que celle de la définition actuelle du mètre existent, qu'elles sont déjà utilisées comme étalons de longueur d'onde, mais que leur liste s'allonge et qu'il serait vain de chercher à en désigner une qui soit préférable,

- qu'on a reconnu qu'il est désirable de ne plus changer la valeur de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide $c = 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$ dont l'emploi a été recommandé par la Résolution 2 de la 15^e Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) (1975) conformément à la Recommandation M 2 adoptée en 1973 par la CCDM,

- que la relation entre la longueur d'onde dans le vide d'une radiation, sa fréquence et la vitesse c laisse la possibilité de choisir par convention deux seulement des trois éléments suivants : définition du mètre, définition de la seconde et valeur de la vitesse c ,

- que les réalisations de la définition actuelle de la seconde sont extrêmement précises, que la fréquence est une grandeur indépendante des paramètres géométriques et qu'elle se prête donc mieux que la longueur à une réalisation et à des mesures précises,

- que par conséquent il est préférable de fixer par convention la définition de la seconde et la valeur de c plutôt que de fixer par convention, comme on l'a fait jusqu'à présent, les définitions de la seconde et du mètre,

- qu'on dispose dès maintenant de méthodes expérimentales pour déterminer la longueur d'onde de plusieurs radiations utilisables pour la mesure des longueurs en se fondant sur la

définition de la seconde et la valeur de c , que ces méthodes fournissent déjà une précision meilleure que l'emploi de la radiation étalon du krypton 86 et que des méthodes encore plus précises sont à l'étude mettant à profit les progrès concernant les lasers et la mesure des très hautes fréquences,

- que, parmi les formes rédactionnelles d'une nouvelle définition du mètre conforme aux considérations qui précèdent, il convient de choisir la plus simple qui ait une signification précise,

- que le CCDM pourra proposer au Comité International des Poids et Mesures (CIPM) l'adoption de recommandations pour la mise en pratique d'une telle définition du mètre,
recommande

- que les laboratoires poursuivent les recherches en vue d'améliorer les étalons de fréquence optiques et d'obtenir des déterminations plus exactes de leur fréquence afin de disposer d'étalons de travail qui puissent être recommandés par le CCDM pour la mise en pratique de la nouvelle définition du mètre proposée,

- que le CIPM prenne en considération la nouvelle définition du mètre suivante :

"Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par les ondes électromagnétiques planes pendant une durée de $1/299\,792\,458$ de seconde"

en vue de la proposer à la CGPM en 1983.

ANNEXE M 1

Documents de travail présentés à la 6^e session du CCDM

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

CCDM/

- 77-1 Questionnaire préparé par le BIPM et adressé aux membres du CCDM le 28 octobre 1977, auquel les destinataires étaient priés de répondre avant le 1^{er} février 1978 (voir Annexe M 2).
- 77-2 Liste des destinataires.
- 78-1 Liste des documents relatifs à cette consultation.
- 78-2 A.H. COOK.- Lettre de réponse au questionnaire du BIPM.
- 78-3 NML (Australie).- Response to questionnaire from CCDM 1977, prepared by J.A. Magyar and P.E. Ciddor.
- 78-4 NPL (Royaume-Uni).- Reply to CCDM questionnaire.
- 78-5 K. SHIMODA.- Lettre de réponse au questionnaire.

CCDM/

- 78-6 NRLM (Japon). -
- a. Answer to BIPM questionnaire.
 - b. Tanaka (K.), Sakurai (T.) and Kurosawa (T.), Frequency Stability and Reproducibility of an Iodine Stabilized He-Ne Laser, *Japan J. Appl. Phys.*, 16, 1977, p. 2071.
 - c. Ohí (M.) and Akimoto (Y.), Improvements in Methane-Stabilized Lasers, *Japan J. Appl. Phys.*, 15, 1976, p. 1853.
 - d. Ito (N.) and Tanaka (K.), Absolute Wavelength Measurements of the Iodine 127 Stabilized He-Ne Laser of NRLM, *Metrologia*, 14, 1978, p. 47.
 - e. Morinaga (A.) and Tanaka (K.), Hyperfine structure in the electronic spectrum of $^{127}\text{I}_2$ by saturated absorption spectroscopy at 633 nm, *Appl. Phys. Letters*, 32, 1978, p. 114.
- 78-7 NRC (Canada). -
- a. Lettre réponse de K.M. Baird.
 - b. Baird (K.M.), Recent work at NRC (Canada) on the improvement of absolute reproducibility and on frequency measurement of CO_2 , CH_4 and I_2 stabilized lasers.
 - c. Whitford (B.G.), Siemsen (K.J.), Riccius (H.D.) and Hanes (G.R.), Absolute frequency measurements of N_2O laser transitions, *Optics Comm.*, 14, 1975, pp. 70-74.
 - d. Hart (K.H.), A laser-source photo-electric microscope for sensing moving scale lines, *Metrologia*, 13, 1977, pp. 63-66.
- 78-8 INM (France). -
- a. Réponse à la consultation des membres du CCDM, par P. Bouchareine et S. Lacroix.
 - b. Laboratoire de l'Horloge Atomique : Cerez (P.), Nouvelles perspectives offertes par le laser He-Ne stabilisé sur l'iode étalon optique multi-longueur d'onde.
 - c. INM : Limitation de la reproductibilité des lasers à hélium-néon asservis sur iode. Etude des effets de déplacements de la fréquence en fonction de l'amplitude de modulation de fréquence.
- 78-9 JILA (États-Unis d'Amérique). -
- a. Response to CCDM questionnaire, by J.L. Hall.
 - b. Brillet (A.), Dallarosa (J.L.), Hall (J.L.) and Drullinger (R.E.), Frequency stability of optically-pumped dimer lasers.
 - c. Hall (J.L.), Layer (H.P.) and Deslattes (R.D.), An acoustooptic frequency and intensity control system for CW lasers.
 - d. Bordé (C.J.), Hall (J.L.), Kunasz (C.V.) and Hummer (D.G.), Saturated absorption line shape : Calculation of the transit-time broadening by a perturbation approach, *Phys. Rev. A*, 14, 1976, pp. 236-263.

CCDM/

- e. Hall (J.L.), Bordé (C.J.) and Uehara (K.), Direct optical resolution of the recoil effect using saturated absorption spectroscopy, *Phys. Rev. Letters*, 37, 1976, pp. 1339-1342.
- f. Hall (J.L.) and Bordé (C.J.), Shift and broadening of saturated absorption resonances due to curvature of the laser wave fronts, *Appl. Phys. Letters*, 29, 1976, pp. 788-790.
- g. Hall (J.L.), Problems of atomic frequency standards of extreme accuracy and a new atomic beam interaction geometry, *Opt. Com.*, 18, 1976, pp. 62-63.
- h. Bergquist (J.C.), Lee (S.A.) and Hall (J.L.), Saturated absorption with spatially separated laser fields : observation of optical "Ramsey" fringes, *Phys. Rev. Letters*, 38, 1977, pp. 159-162.
- i. Hall (J.L.) and Lee (S.A.), Interferometric real-time display of CW dye laser wavelength with sub-Doppler accuracy, *Appl. Phys. Letters*, 29, 1976, pp. 367-369.
- j. Hall (J.L.), Poulsen (O.) and Lee (S.A.), Two-photon optical frequency standards.

78-10 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne).- Reply to the questionnaire of the BIPM of 28 octobre 1977.

78-10 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne).-
bis

- a. Rapport complet de 1977 de la PTB : *PTB-Jahresbericht 1977*.
- b. Spieweck (F.), Wavelength stabilization of the Ar⁺ laser line at $\lambda = 515$ nm for length measurements of highest precision. Laser 77 Opto-Electronics, Conf. Proc. IPC Science and Technology Press Ltd., Guildford 1977, p. 130.

78-11 NBS (États-Unis d'Amérique).-

- a. NBS response to BIPM questionnaire of october 28, 1977 to the Comité Consultatif pour la Définition du Mètre.
- b. Barger (R.L.), West (J.B.) and English (T.C.), Fast frequency stabilization of a CW dye laser, *Appl. Phys. Letters*, 27, 1975, pp. 31-33.
- c. Barger (R.L.), English (T.C.) and West (J.B.), Laser saturated absorption of the calcium $^1S_0 - ^3P_1$ transition at 6573 Å, *Opt. Comm.*, 18-1, 1976, p. 58.
- d. Hall (J.L.), Layer (H.P.) and Deslattes (R.D.), An acoustooptic frequency and intensity control system for CW lasers. Conference on laser engineering. June 1977, Washington D.C. , Digest of papers, p. 45.
- e. Schweitzer (W.G.) Jr., Kessler (E.G.) Jr., Deslattes (R.D.), Layer (H.P.), and Whetstone (J.R.), Description, performance and wavelengths of iodine stabilized lasers, *Appl. Optics*, 12, 1973, pp. 2927-2938.
- f. Bordé (C.J.), Hall (J.L.), Kunasz (C.V.) and Hummer (D.G.), Saturated absorption line shape : calculation of the transit-time broadening by a perturbation approach, *Phys. Rev. A*, 14, 1976, pp. 236-263.

CCDM/

- g. Hall (J.L.), Bordé (C.J.) and Uehara (K.), Direct optical resolution of the recoil effect using saturated absorption spectroscopy, *Phys. Rev. Letters*, 37, 1976, pp. 1339-1342.
 - h. Hall (J.L.) and Bordé (C.J.), Shift and broadening of saturated absorption resonances due to curvature of the laser wave fronts, *Appl. Phys. Letters*, 29, 1976, pp. 788-790.
 - i. Hall (J.L.), Problems of atomic frequency standards of extreme accuracy and a new atomic beam interaction geometry, *Opt. Comm.*, 18, 1976, pp. 62-63.
 - j. Bergquist (J.C.), Lee (S.A.) and Hall (J.L.), Saturated absorption with spatially separated laser fields : observation of optical "Ramsey" fringes, *Phys. Rev. Letters*, 38, 1977, pp. 159-162.
 - k. Layer (H.P.), Deslattes (R.D.) and Schweitzer (W.G.) Jr., Laser wavelength comparison by high resolution interferometry, *Appl. Optics*, 15, 1976, pp. 734-743.
 - l. Barger (R.L.) and Hall (J.L.), Wavelength of the 3.39 μm laser-saturated absorption line of methane, *Appl. Phys. Letters*, 22, 1973, pp. 196-199.
 - m. Hall (J.L.) and Lee (S.A.), Interferometric real-time display of CW dye laser wavelength with sub-Doppler accuracy, *Appl. Phys. Letters*, 29, 1976, pp. 367-369.
 - n. Evenson (K.M.) *et al.*, Speed of light from direct frequency and wavelength measurements of the methane-stabilized laser, *Phys. Rev. Letters*, 29, 1972, pp. 1346-1349.
 - o. Evenson (K.M.), Jennings (D.A.), Peterse (F.R.) and Wells (J.S.), Laser frequency measurements : a review, limitations, extension to 197 THz (1.5 μm), *Laser Spectroscopy III*, J.L. Hall and J.L. Carlsen Editors, Springer-Verlag, 1977, pp. 56-68.
- 78-11 NBS (États-Unis d'Amérique).-
bis
- a. Complément
 - b. Snyder (J.J.), A compact, static wavelength meter for both pulsed and CW lasers. To be published in the Proceedings of the Vth All-Union Vavilov Conference on Nonlinear Optics.
- 78-12 IMM (U.R.S.S.).- Réponses de l'IMM au questionnaire du BIPM.
- 78-13 BIPM.-
- a. Réponse du BIPM au questionnaire.
 - b. Réponse de J. Terrien (Directeur honoraire du BIPM).
- 78-14 L. FRENKEL.- Réponse à la lettre du 3 mars 1978.
- 78-15 ASMW (Rép. Dém. Allemande).- Réponses au questionnaire relatif aux problèmes du CCDM.

CCDM/

- 78-16 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Réponse à la lettre du
3 mars 1978.
- 78-17 NML (Australie).- Id.
- 78-18 A.H. COOK.- Id.
- 78-19 NPL (Royaume-Uni).- Id.
- 78-20 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne).- Id.
- 78-21 NRC (Canada).- Id.
- 78-22 JILA (États-Unis d'Amérique).- Id.
- 78-23 ASMW (Rép. Dém. Allemande).- Id.
- 78-24 K. SHIMODA.- Id.
- 78-25 NRLM (Japon).- Id.
- 78-26 IMM (U.R.S.S.).- Id.
- 78-27 BIPM.- Rapport du BIPM sur les réponses au question-
naire du 28 octobre 1977 envoyé aux membres du CCDM
(voir Annexe M 2).
- 79-1 Convocation et ordre du jour
- 79-2 NML (Australie).- Contribution to the sixth meeting
of the Consultative Committee for the Definition
of the Metre
- 79-3 NRLM (Japon).-
a. Morinaga (A.) and Tanaka (K.), Hyperfine structure in the
electronic spectrum of $^{127}\text{I}_2$ by saturated absorption
spectroscopy at 633 nm, *Appl. Phys. Letters*, 32, 1978,
pp. 114-116.
b. Tanaka (K.) and Morinaga (A.), Preliminary experiment for
stabilizing unmodulated He-Ne laser to an iodine hyperfine
component, *J. Appl. Phys.*, 50, 1979, pp. 38-40.
c. Ito (N.) and Tanaka (K.), Absolute wavelength measurements
of the iodine 127 stabilized He-Ne laser of NRLM,
Metrologia, 14, 1978, pp. 47-51.

CCDM/

- 79-4 K. SHIMODA.- References for CCDM/78-27 and further studies at Tokyo Institute of Technology :
- Nakao (M.) and Tako (T.), Frequency stability of an $^{127}\text{I}_2$ stabilized He-Ne laser.
 - Shimoda (K.) and Tako (T.), Recent results on laser frequency stabilization in Japanese institutes, *Proc. 2nd Frequency Standards and Metrology Symposium*, July 1976, at Copper Mountain, USA.
 - Nakasawa (M.), Musha (T.) and Tako (T.), Frequency-stabilized 3.39 μm He-Ne laser with no frequency modulation, *J. Appl. Phys.*, 50, 1979, pp. 2544-2547.
 - Nakasawa (M.), Tako (T.) and Musha (T.), Observation of saturated absorption of external CH_4 cell with low-noise optical amplifier, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 18, 1979, pp. 597-602.
 - Ohtsu (M.) and Tako (T.), Frequency stability of an H_2CO -stabilized He-Xe laser in an axial magnetic field, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 17, 1978, pp. 2169-2170.
 - Ohtsu (M.) and Tako (T.), Measurement of the width of the inverted Lamb-dip in H_2CO at 3.51 μm , *J. Appl. Phys.*, 50, 1979, pp. 599-601.
 - Ohtsu (M.), Koyama (R.) and Tako (T.), Improvements in an H_2CO -stabilized He-Xe laser at 3.51 μm .
- 79-4 K. SHIMODA.- Lettre (Commentaires sur les lasers stabi-
bis lisés sur I_2 , CH_4 et H_2CO).
- 79-5 NBS (États-Unis d'Amérique).- Frequency measurement of the 260 THz (1.15 μm) He-Ne laser by D.A. Jennings, F.R. Petersen and K.M. Evenson.
- Abstract.*- Absolute infrared frequency measurement has been extended to 260 THz with the measurement of the strong 1.15 μm laser line in ^{20}Ne . The frequency was synthesized in non-linear crystals of CdGeAs_2 and Ag_3AsS_3 from stabilized CO_2 lasers and the 1.5 μm laser line in ^{20}Ne . The measured frequency is $\nu_{^{20}\text{Ne}}$, 1.15 μm = 260.103 264(30) THz.
- 79-6 NBS.- Laser frequency metrology since 1973.
- 79-7 NBS.- Atomic mercury lasers ; Iodine stabilized lasers.
- 79-8 NBS.- Re-definition of the meter
- 79-9 L. FRENKEL.- Lettre (Commentaires sur la définition du mètre).

CCDM/

- 79-10 INM (France).- La mesure des longueurs d'onde lumineuses par interférométrie à deux ondes à champ compensé, par P. Bouchareine et B. Rougié.

Abstract.- We made wavelengths comparisons with a compensated field two beam interferometer giving a flat field of interference at path differences 0 cm, 25 cm, 52 cm and 77 cm.

Bad homogeneity of krypton lamp illumination is responsible of systematic errors of the order of 10^{-2} fringe. However, we could measure fractional excesses with krypton lines up to 77 cm within a few 10^{-3} fringe, allowing us to determine the path difference by exact fractions method. Fractional excesses were measured at this path difference for some radiations of a helium neon laser stabilized by iodine saturated absorption with an accuracy of a few 10^{-4} fringe.

- 79-11 Laboratoire de Physique des Lasers de l'Université Paris-Nord et PTB (Rép. Féd. d'Allemagne).- Reproducibility and uncertainty capability of I_2 stabilized argon ion lasers, by G. Camy and F. Spieweck.
- 79-12 BIPM.- Complément à la réponse du BIPM (CCDM/78-13a).
- 79-13 Liste des documents de travail.
- 79-14 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne).- Infrared frequency measurements ; present status at the PTB, by M. Grinda, G. Kramer, O. Weiss and Y.C. Ni.
- 79-15 PTB.- Recent activities in the field of stabilized lasers in the visible range, by G. Gläser *et al.*
- 79-16 PTB.- Calibrations of Väisälä-Standards by the PTB, by F. Bayer-Helms and H. Darnedde.
- 79-17 NRC (Canada).- Progress at NRC regarding the definition of the metre.
- 79-18 INM (France) et PTB (Rép. Féd. d'Allemagne).- Note sur une comparaison de longueur d'onde entre le laser à Ar de la PTB et un laser à He-Ne de l'INM, par P. Bouchareine, R. Rougié et F. Spieweck.

CCDM/

- 79-19 Laboratoire de l'Horloge Atomique [LHA], France.-
He-Ne laser stabilized by saturated absorption
in $^{127}\text{I}_2$ at 612 nm
- 79-20 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne).- Wavelength comparisons,
by G. Bönsch.
- 79-21 PTB.- Compilation of wavelength measurements at
 $\lambda = 515$ nm, by F. Bayer-Helms.
- 79-22 IMM (U.R.S.S.).- Avis de l'URSS sur le problème du
changement de la définition du mètre.
- 79-23 CSMU (Tchécoslovaquie).- Communication concernant la
problématique des lasers à He-Ne asservis sur
l'absorption de l'iode.
- 79-24 CSMU.- Communication concernant les comparaisons
internationales relatives aux étalons angulaires.
- 79-25 CSMU.- Communication concernant le document CCDM/79-2.
- 79-26 CSMU.- Coincidences of $^{127}\text{I}_2$ lines and the 3s-2p
visible transitions of CW helium-neon laser, by
J. Blabla.
Abstract.- The coincidence between some of neon 3s-2p
transitions and rotational-vibrational lines of the $^{127}\text{I}_2$
molecule has been computed. An excellent coincidence between
the iodine R47 line and 3s₂-2p₆ transition at 611.97 nm has
been found. The results are discussed.
- 79-27 IMGC (Italie).- Contribution pour la 6^e session du
Comité Consultatif pour la Définition du Mètre.
- 79-28 NIM (Rép. Pop. de Chine).- Performance investigation
of iodine saturated absorption stabilized He-Ne
lasers, by Shen Nai-cheng, An Chia-luan, Wu Yao-hsing,
Sun I-min and Shih Han-chien.
- 79-29 NIM.- Methane saturated absorption stabilized He-Ne
lasers, by Chao Ke-Kung, Chang Hsuch-ping,
Chao Chia-chi and Li Cheng-hsian.

CCDM/

- 79-30 NRLM and Faculty of Engineering, Yokohama (Japon).-
Pressure and power broadenings of the saturated
absorption lines of iodine at 633 nm, by T.
Sakurai, S. Iwasaki, T. Oshida and K. Tanaka.
Publié dans *Jpn. J. Applied. Phys.*, 18, No. 6, 1979, p. 1199.
- 79-31 Research Laboratory of Precision Machinery and
Electronics, Yokohama and NRLM (Japon).-
Wavelength measurements of an H₂CO-stabilized
He-Xe laser at 3.15 μ m, by T. Tako, M. Ohtsu,
S. Katsuragi, M. Ohi and Y. Akimoto.
-

ANNEXE M 2

Consultation préalable par correspondance

A. Questionnaire adressé par le BIPM aux membres du CCDM le 28 octobre 1977.

B. Questionnaire complémentaire envoyé par le BIPM aux mêmes destinataires le 3 mars 1978.

C. Rapport du BIPM d'après les réponses aux deux questionnaires.

M 2-A

QUESTIONNAIRE

(28 octobre 1977)

Il ne paraît pas justifié de réunir le CCDM dans un proche avenir ; en effet, il semble qu'aucune décision urgente ne soit à discuter.

Néanmoins, il est utile de faire le point des travaux effectués ou entrepris dans les divers laboratoires.

Nous vous demandons donc de bien vouloir répondre au questionnaire suivant avant la date limite du 1^{er} février 1978.

Les réponses à ce questionnaire seront portées à la connaissance des membres du CCDM et il en sera fait rapport au Comité International des Poids et Mesures.

Questions

Sont concernés essentiellement vos résultats expérimentaux obtenus depuis la dernière session du CCDM en juin 1973.

Des références bibliographiques complèteraient utilement les réponses.

1.- *Réalisation de lasers à fréquence asservie*

Avez-vous à signaler des améliorations ou des méthodes nouvelles en ce qui concerne, entre autres :

- le phénomène utilisé pour l'asservissement (p. ex. absorption à deux photons, dispersion saturée, ...)
- le type de laser asservi (p. ex. à colorant, à argon, ...)
- la référence utilisée pour l'asservissement (p. ex. raie d'absorption de I_2 , ...)
- la boucle d'asservissement (p. ex. dispositif électronique, transducteur, ...).

2.- *Résultats de l'étude de la stabilité et de la reproductibilité des lasers à fréquence asservie*

2-1. Stabilité

- a) lasers à He-Ne (I_2)
- b) lasers à He-Ne (CH_4)
- c) autres lasers (à argon, à colorant, ...).

2-2. Reproductibilité

- a) lasers à He-Ne (I_2) ; effets de déplacement (pression, amplitude de la modulation, température, système d'asservissement : dérivée première ou autre ...).
Résultats de comparaisons entre lasers de fabrication différente.
- b) lasers à He-Ne (CH_4) ; mêmes rubriques que ci-dessus.
- c) autres lasers ; mêmes rubriques que ci-dessus.

3.- *Mesures de longueurs d'onde de lasers asservis*

3-1. Valeur obtenue pour le rapport $\lambda(CH_4)/\lambda(Kr)$

3-2. " " " " $\lambda(I_2)/\lambda(Kr)$

3-3. " " " " $\lambda(CH_4)/\lambda(I_2)$

3-4. Avez-vous étudié la longueur d'onde d'autres lasers asservis ?

3-5. Dans chaque cas, quel est le principe de la méthode utilisée : interféromètre (Michelson, Perot-Fabry, ...), récepteur, faisceaux gaussiens ou non, "up-conversion", éventuellement corrections principales (diffraction ..).

4.- *Mesures de fréquences*

4-1. Avez-vous mesuré la fréquence de radiations intéressant le CCDM, en particulier avez-vous obtenu une valeur pour le rapport $v(\text{CH}_4)/v(\text{Cs})$; quelle est, en bref, la méthode utilisée ?

4-2. Avez-vous fait des mesures relatives de différences ou de rapports de fréquence ? lesquelles ?

5.- *Vitesse de la lumière*

Quelles conséquences de vos résultats pouvez-vous tirer concernant la vitesse de la lumière ?

6.- *Mesures de longueur*

Avez-vous des résultats :

6-1. de comparaisons internationales d'étalons à traits ou à bouts ?

6-2. de nouvelles études de l'indice de réfraction de l'air ?

7.- *Divers*

7-1. Avez-vous obtenu d'autres résultats ou avez-vous des commentaires à faire dans le domaine intéressant le CCDM ?

7-2. Si vous avez connaissance de résultats concernant les différentes rubriques de ce questionnaire obtenus dans des laboratoires qui ne sont pas membres du CCDM, pouvez-vous nous donner toutes informations utiles (références bibliographiques, adresses, personnes à contacter dans ces laboratoires, etc.) ?

8.- *Conclusions*

Quels sont, à votre avis, les progrès à accomplir ou les nouvelles recherches à entreprendre avant d'envisager un changement de la définition du mètre ?

M 2-B

QUESTIONNAIRE COMPLÉMENTAIRE

(3 mars 1978)

1° - En réponse au Questionnaire que le BIPM a adressé aux membres du CCDM en octobre 1977 qui était destiné à faire le point sur l'état actuel des études effectuées sur les lasers à fréquence asservie et les mesures de longueur, nous avons reçu un certain nombre de documents.

Nous diffuserons plus tard un rapport de synthèse mais, sans plus attendre, nous vous envoyons copie des réponses au Questionnaire ; la liste complète des documents reçus par le BIPM, ci-jointe, porte le numéro CCDM/78-1.

Vous voudrez bien noter, d'une part, que nous ne vous renvoyons pas vos propres documents et, d'autre part, que nous n'avons pas reproduit les articles déjà publiés.

2° - Le Comité Consultatif des Unités doit se réunir à Sèvres du 17 au 19 mai 1978. Un des points de son ordre du jour est la question du changement éventuel de la définition du mètre, or l'examen des réponses reçues ne nous permet pas d'éclairer le CCU d'une façon très précise sur l'opinion des membres du CCDM sur ce sujet.

Nous nous permettons donc de vous poser plus nettement une question en trois points :

a) Vous semble-t-il souhaitable qu'une nouvelle définition du mètre soit proposée par la prochaine Conférence Générale des Poids et Mesures en 1979 ?

b) La définition proposée par le CCU telle qu'elle est exposée dans le document 78-13b, c'est-à-dire fondée sur l'étalon au césium en fixant implicitement une valeur définitive de c , reçoit-elle votre agrément ? Sinon, quelle serait votre proposition ?

c) Si votre réponse est positive pour le premier paragraphe, seriez-vous d'accord pour la convocation du CCDM au cours du deuxième semestre de 1978 ?

M 2-C

État d'avancement des études sur les lasers asservis et définition du mètre

Rapport du BIPM d'après les réponses aux deux questionnaires

Sur les quatorze membres du CCDM consultés, douze (BIPM non compris) ont répondu au questionnaire du 28 octobre 1977, ce qui montre l'intérêt de la consultation.

Depuis 1973, date de la dernière session du CCDM, les travaux ont été poursuivis sur les lasers à hélium-néon asservis sur des raies d'absorption de l'iode ou du méthane pour améliorer leur stabilité et leur reproductibilité : les causes d'élargissement ou de déplacement des profils spectraux ont été systématiquement expérimentées et théoriquement étudiées. Les travaux ont été aussi poursuivis sur les lasers à CO_2 .

Les possibilités d'utilisation d'autres lasers ont été explorées ou confirmées : lasers à argon, à xénon et lasers à colorants dont on peut s'attendre à un usage de plus en plus important ; on étudie aussi les possibilités de nouvelles méthodes : dispersion saturée, résonances de Ramsey, etc.

En ce qui concerne les mesures de longueurs d'onde de lasers, peu de résultats nouveaux sont signalés.

Quelques mesures absolues de fréquence ont été faites, mais il apparaît que peu de laboratoires sont équipés pour ce genre de mesures.

Les mesures de longueur présentent toujours, naturellement, un grand intérêt pratique, mais très peu de résultats de comparaisons internationales sont disponibles.

Enfin, les commentaires, suggestions et réflexions relatifs à la possibilité d'envisager une nouvelle définition du mètre montrent bien sous tous leurs aspects les diverses questions que soulève ce point.

1. LASERS À HÉLIUM-NÉON

1.1 - Lasers à He-Ne asservis sur I_2

1.1.1 - Stabilité. - Le tableau suivant résume les résultats des mesures de stabilité caractérisée par la variance d'Allan $\langle \sigma^2(2, \tau) \rangle^{1/2}$, où τ est la durée d'un échantillon.

Stabilité des lasers asservis sur l'iode ($\lambda = 0,633 \mu\text{m}$)

NML *	$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = 3,7 \times 10^{-12}, \tau = 100 \text{ s} ; 3 \text{ miroirs, He-}^{20}\text{Ne, }^{129}\text{I} \\ \sigma = 7 \times 10^{-13}, \tau = 100 \text{ s} ; 2 \text{ miroirs, He-}^{20}\text{Ne, }^{127}\text{I } ^{129}\text{I} \end{array} \right.$		
NPL		$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = 1 \times 10^{-11}, \tau = 1 \text{ s} \\ \sigma = 1 \times 10^{-12}, \tau = 100 \text{ s} \\ \sigma = 5 \times 10^{-13}, \tau = 100 \text{ s} \end{array} \right.$	cellule à t normale
Shimoda **	$\sigma = 1,1 \times 10^{-11}, \tau = 100 \text{ s}$		cellule à $t = 130 \text{ }^\circ\text{C}$
NRLM	$\sigma = 3 \times 10^{-12}, \tau = 50 \text{ à } 200 \text{ s}$		
PTB	$\sigma = 3 \times 10^{-13}, \tau = 1000 \text{ s}$		
NBS	$\sigma = 2 \times 10^{-12}, \tau = 10 \text{ s}$		
IMM	$\sigma = 1,5 \times 10^{-11}, \tau = 10 \text{ s}$		
BIPM	$\sigma = 3 \times 10^{-12}, \tau = 10 \text{ s}$		

* Le NML donne σ pour 1 laser (en multipliant la variance d'Allan par $1/\sqrt{2}$).

** Résultat obtenu au Tokyo Institute of Technology.

Pour comparer ces résultats il faut tenir compte de τ , car σ est proportionnel à $\tau^{-1/2}$ jusqu'à une certaine valeur de τ où l'on constate un minimum de σ ; cette valeur de τ est d'autant plus grande que la qualité de l'appareillage est meilleure.

La PTB signale que la stabilité est meilleure avec $^{129}\text{I}_2$ qu'avec $^{127}\text{I}_2$.

Des expériences en cours montrent qu'on peut améliorer la stabilité en portant la cuve d'absorption de l'iode à une température de l'ordre de 150 °C en maintenant la pression constante (NPL, NRC, Laboratoire de l'Horloge Atomique (LHA) cité par l'INM).

Au NML, un laser asservi sur une composante de $^{127}\text{I}^{129}\text{I}$ située à environ 161 MHz vers le bleu de la composante k de $^{129}\text{I}_2$ a montré une stabilité de 7×10^{-13} (par laser) avec $\tau = 100$ secondes.

1.1.2 - Reproductibilité. - La reproductibilité de la fréquence de ces lasers a fait l'objet de nombreuses expériences qui ont mis en évidence plusieurs causes pouvant faire varier la fréquence ou élargir le profil spectral de la radiation émise.

- Les réflexions sur les détecteurs peuvent produire, par effets de couplage, des déplacements de l'ordre de quelques dizaines de kilohertz.

- La fréquence asservie est plus élevée de quelques kilohertz si, pour l'asservissement, on utilise le centre du faisceau plutôt que les bords.

- Un défaut d'alignement de l'optique peut produire un déplacement de quelques dizaines de kilohertz.

- L'effet de la pression de l'iode dans la cellule a été étudié pour plusieurs composantes ; les résultats indiquent un déplacement de la fréquence compris entre - 6 et - 8 kHz (soit - 1,2 à - 1,6 $\times 10^{-11}$) par pascal. Il semble que l'on puisse extrapoler la valeur de la fréquence à pression nulle avec une exactitude relative de $\pm 2 \times 10^{-11}$ (PTB). D'autre part, l'élargissement du profil est d'environ 100 kHz par pascal.

- L'effet de l'amplitude de la modulation crête à creux est de l'ordre de - 4,5 à - 13 kHz (soit - 0,9 à - 2,6 $\times 10^{-11}$) par mégahertz ; cet effet peut varier d'un laser à l'autre. On a observé une dissymétrie des profils spectraux, visible avec la détection par le 2^e ou le 3^e harmonique, qui paraît cohérente avec le signe des déplacements observés.

- On a observé des effets dus à la puissance : des déplacements de la fréquence atteignant 50 kHz pour une variation de la puissance surfacique de 20 à 150 kW/m² et aussi, en modifiant la position de la cellule à iode dans la cavité, des déplacements qui dépendent de la puissance surfacique et qui peuvent atteindre 30 kHz (NML). D'autre part, l'élargissement

des profils spectraux mesuré sur les composantes h i j de $^{127}\text{I}_2$ est d'environ 12 % par milliwatt entre 0,8 et 3,2 mW (NRLM) et, mesuré sur le pic k de $^{129}\text{I}_2$, d'environ 10 % lorsque la pression est multipliée par 5 ou 6 dans le domaine de 15 à 125 μW (NBS). L'apparition de pics parasites qui peuvent produire des déplacements jusqu'à 80 kHz a été signalée sur des lasers à $^{129}\text{I}_2$ (^{22}Ne) lorsque la puissance dépasse 100 μW (BIPM, PTB).

- Le profil de dispersion non linéaire a été mesuré pour la composante k de $^{129}\text{I}_2$ (NML) ; une modulation de crête à creux de 6 MHz devrait produire une distorsion du 3^e harmonique de 0,035 % ; on peut s'attendre à une distorsion inférieure à 0,008 % du 3^e harmonique pour $^{127}\text{I}_2$ et ^{129}I .

Toutes les propriétés physiques de ce type de laser étant connues, on se propose (NRC) de formuler à l'aide d'un ordinateur un modèle mathématique permettant de trouver la configuration optimale du laser et du circuit d'asservissement.

Connaissant ces causes perturbatrices de la fréquence, il est encore plus intéressant d'examiner les résultats des comparaisons, entre plusieurs laboratoires, de lasers de construction différente. D'après les comparaisons auxquelles le BIPM a participé, on peut retenir que les différences entre lasers fonctionnant dans les mêmes conditions de pression de l'iode et d'amplitude de modulation sont, en général, inférieures à ± 10 kHz avec un écart-type de 2 à 5 kHz, soit une reproductibilité de l'ordre de $\pm 2 \times 10^{-11}$; dans un cas, cependant, on a observé une différence de 6×10^{-11} (NRLM).

On a fait remarquer (PTB) qu'il conviendrait aussi de caractériser l'exactitude de ces fréquences lasers, c'est-à-dire évaluer (par extrapolation à puissance et à amplitude de modulation nulles) l'incertitude de la réalisation de la fréquence de la transition atomique ou moléculaire qu'on estime à 10^{-10} en valeur relative.

1.1.3 - Laser asservi à $\lambda = 0,612 \mu\text{m}$. - L'INM signale l'étude faite par le Laboratoire de l'Horloge Atomique (LHA) sur un laser He-Ne qu'on peut stabiliser par absorption saturée de l'iode 127 sur une raie orangée à $\lambda = 0,6118 \mu\text{m}$ et, espère-t-on, sur une raie à $\lambda = 0,6401 \mu\text{m}$ grâce à l'insertion d'un prisme à l'angle de Brewster dans la cavité laser.

1.3 - Lasers à He-Ne asservis sur CH_4

1.2.1 - Stabilité. - Le tableau ci-après indique la stabilité de ces lasers à $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$.

Stabilité des lasers asservis sur le méthane ($\lambda = 3,39 \mu\text{m}$)

NPL	$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = 6 \times 10^{-12}, \tau = 1 \text{ s} \\ \sigma = 5 \times 10^{-13}, \tau = 100 \text{ s} \end{array} \right.$	
Shimoda*		$\sigma = 2 \times 10^{-12}, \tau = 20 \text{ s}$
NRLM	$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = 1,8 \times 10^{-12}, \tau = 30 \text{ s ; montage à 2 lasers} \\ \sigma = 3 \times 10^{-12}, \tau = 40 \text{ s ; montage à 3 lasers} \end{array} \right.$	
PTB		$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = 1 \times 10^{-13}, \tau = 1 \text{ s ; } 1^{\text{re}} \text{ dérivée} \\ \sigma = 4 \times 10^{-13}, \tau = 1 \text{ s ; } 3^{\text{e}} \text{ dérivée} \\ \sigma = 2 \times 10^{-13}, \tau = 100 \text{ s ;} \end{array} \right.$
IMM	$\sigma = 2 \times 10^{-13} \times \tau^{-1/2}$	avec $1 \leq \tau \leq 100 \text{ s}$

* Résultat obtenu au Tokyo Institute of Technology.

Les valeurs de σ sont encore proportionnelles à $\tau^{-1/2}$. Les meilleurs résultats sont 1×10^{-13} avec $\tau = 1$ seconde et 2×10^{-13} avec $1 \leq \tau \leq 100$ secondes. Par rapport aux lasers stabilisés sur l'iode, on constate que ces lasers stabilisés sur le méthane présentent, du point de vue de la stabilité, un avantage certain.

1.2.2 - Reproductibilité. - Pour ces lasers asservis sur le méthane, on a aussi étudié les causes pouvant provoquer un changement de fréquence ou de profil spectral ; plusieurs de ces causes sont d'ailleurs communes aux lasers asservis sur CH_4 et aux lasers asservis sur I_2 . Ce sont :

- Les effets de couplage dus à des réflexions parasites qui peuvent déplacer la fréquence de quelques dizaines de kilohertz.

- L'effet de pression du méthane qui élargit le profil spectral selon la relation $\Delta\nu = 170 \text{ kHz} + (111 \text{ kHz/Pa})p$, où $\Delta\nu$ est la demi-largeur à mi-hauteur et p varie de 0,1 à 2,4 Pa (NRLM).

- L'effet de l'amplitude de la modulation : on a mesuré un déplacement d'environ 20 kHz par mégahertz (crête à creux) en utilisant pour l'asservissement la dérivée première (BIPM), soit un déplacement relatif de 2×10^{-10} par mégahertz.

- Enfin, selon le mode d'asservissement, par exemple suivant qu'on utilise la dérivée première ou la dérivée troisième, on a mesuré des déplacements jusqu'à 15 kHz (NRLM).

Les comparaisons entre plusieurs laboratoires de lasers stabilisés sur CH_4 à l'aide du signal de la dérivée première

ont fait apparaître des différences de l'ordre de quelques kilohertz soit, en valeur relative, une concordance à $\pm 3 \times 10^{-11}$ environ (BIPM). Lors d'une comparaison entre lasers stabilisés à l'aide du signal de la dérivée troisième on a obtenu une différence de $1,4 \times 10^{-11}$ (NPL). Des expériences faites en dispersion saturée ont montré une reproductibilité de $\pm 5 \times 10^{-12}$ et on estime que l'exactitude de la fréquence dans ce cas est aussi de $\pm 5 \times 10^{-12}$ (PTB). Un laboratoire indique une reproductibilité de 1×10^{-14} (IMM).

Du point de vue de la reproductibilité aussi, il semble donc qu'un avantage apparaisse en faveur de l'asservissement sur le méthane par rapport à l'asservissement sur l'iode.

1.3 - Longueurs d'onde

Les valeurs des longueurs d'onde des lasers stabilisés sur l'iode et sur le méthane recommandées par le CCDM en 1973 sont :

$$^{127}\text{I}_2(^{20}\text{Ne}), \text{ pic i} : \lambda = 632\,991,399 \times 10^{-12} \text{ m}$$

$$\text{CH}_4, \text{ P}(7) \quad , \quad \nu_3 \quad : \lambda = 3\,392\,231,40 \times 10^{-12} \text{ m.}$$

Pour l'iode, trois laboratoires indiquent les résultats suivants obtenus par rapport à l'étalon primaire du krypton 86 au moyen d'interféromètres de Perot-Fabry :

NRLM :

$$^{127}\text{I}_2, \text{ pic i} : \lambda = 632\,991\,399,95 \text{ fm} ; \sigma = 1,9 \text{ fm}$$

NML :

$$^{129}\text{I}_2, \text{ pic m} : \lambda = 632\,991\,329,7 \text{ fm} ; \sigma = 0,7 \text{ fm}$$

IMM :

$$^{127}\text{I}_2, \text{ pic g} : \lambda = 632\,991\,229 \text{ fm} ; \sigma = 2,5 \text{ fm}$$

$$^{127}\text{I}_2, \text{ pic f} : \lambda = 632\,991\,213 \text{ fm.}$$

Pour ces trois dernières composantes, les valeurs recommandées, calculées d'après les tableaux publiés en 1973 (CCDM, 5^e session, 1973, p. M 25 et M 26) sont :

$$^{129}\text{I}_2, \text{ pic m} : \lambda = 632\,991\,327,4 \text{ fm}$$

$$^{127}\text{I}_2, \text{ pic g} : \lambda = 632\,991\,231 \text{ fm}$$

$$^{127}\text{I}_2, \text{ pic f} : \lambda = 632\,991\,213,4 \text{ fm}$$

Les écarts relatifs avec les valeurs mesurées n'excèdent donc pas 4×10^{-9} .

Pour le méthane, un seul laboratoire (PTB) donne des valeurs récentes obtenues par comparaison à l'étalon primaire du krypton 86, dans un interféromètre du type Michelson :

avec stabilisation sur la dérivée 1^{re} :

$$\lambda = 3\ 392\ 231\ 409\ \text{fm} \pm 6 \times 10^{-9}$$

avec stabilisation sur la dérivée 3^e :

$$\lambda = 3\ 392\ 231\ 414\ \text{fm} \pm 5 \times 10^{-9}$$

et fait remarquer que ces valeurs sont plus élevées, respectivement de 3×10^{-9} et 4×10^{-9} , que celle recommandée en 1973.

Une détermination de $\lambda(\text{CH}_4)$ a été faite par rapport à $\lambda(\text{I}_2)$ au moyen d'un spectro-interféromètre Perot-Fabry et a donné 3 392,231 40 nm (LMM).

Une autre mesure (NBS) donne le rapport des longueurs d'onde (He-Ne, CH_4 , P(7), ν_3)/(He-Ne, $^{129}\text{I}_2$, pic k) :
5,359 049 260 6 ; $\sigma = 1,8 \times 10^{-10}$.

1.4 - Fréquences

Les déterminations nouvelles des fréquences de ces deux radiations de lasers sont peu nombreuses. Au NPL, la valeur de la fréquence de CH_4 F2(2) a été obtenue en mélangeant le troisième harmonique de la raie R(32) du CO_2 à une fréquence de laser He-Ne à 3,39 μm asservi avec décalage de fréquence.

$$\text{CH}_4\ \text{F2}(2) = 88\ 376\ 181,608\ \text{MHz} \pm 0,043\ \text{MHz}, \text{ soit } \pm 5 \times 10^{-10}.$$

Le NRC donne la valeur suivante pour la même radiation :

$$88\ 376\ 181,620\ \text{MHz} \pm 0,090\ \text{MHz}, \text{ soit } \pm 1 \times 10^{-9}.$$

D'autre part, en combinant la valeur de la fréquence de CO_2 R(12) et celle du rapport des longueurs d'onde du pic d de $^{127}\text{I}_2$ et de la radiation résultant du mélange, dans un cristal non linéaire ("up-conversion"), des deux radiations d $^{127}\text{I}_2$ et CO_2 R(12), le NPL a obtenu :

$$^{127}\text{I}_2, \text{ d} = 473\ 612\ 380,5\ \text{MHz} \pm 0,3\ \text{MHz}, \text{ soit } \pm 6 \times 10^{-10}.$$

1.4.1 - Intervalles de fréquence.- Plusieurs mesures d'intervalles de fréquences ont été faites entre les pics de $^{127}\text{I}_2$ dans des lasers à He-²⁰Ne (NML, NRLM, BIPM), de $^{129}\text{I}_2$ dans des lasers soit à He-²⁰Ne soit à He-²²Ne (NML, BIPM), de même que des mesures d'intervalles entre composantes de ces trois groupes (BIPM). L'incertitude indiquée de ces déterminations faites par mesures de battements s'étend de quelques kilohertz à une vingtaine de kilohertz. Il semblerait que ces mesures d'intervalles faites avec $^{129}\text{I}_2$ sont un peu moins reproductibles

Au NRLM, on a fait des mesures d'intervalles avec deux lasers stabilisés sur la fluorescence saturée dans une cuve à CO₂ interne. On a obtenu les différences suivantes, (N = nombre de mesures) :

$$P(18) - P(20) : \delta f = 53\,548,877 \pm 0,041 \text{ MHz} ; N = 249$$

$$P(20) - P(22) : \delta f = 54\,283,213 \pm 0,052 \text{ MHz} ; N = 100$$

La différence de fréquence δf est obtenue par la mesure de la fréquence des battements f_b qui est produite dans la diode W-Ni (M-I-M) de la façon suivante :

$$\delta f = (f_{\text{CO}_2} - f'_{\text{CO}_2}) = n f_{\mu\text{W}}(10 \text{ GHz}) \pm f_b ;$$

$f_{\mu\text{W}}$, asservi sur l'oscillateur de référence, est la fréquence micro-onde dont le n^{ème} harmonique est produit dans la diode.

2.2 - Lasers à gaz rares

Les travaux effectués à la PTB sur le laser à argon ionisé, stabilisé sur des raies hyperfines de l'iode principalement à $\lambda = 0,515 \mu\text{m}$, ont conduit aux résultats suivants* où σ est la variance d'Allan et τ le temps de mesure en secondes :

	Absorption linéaire	Absorption saturée	
	cuve externe	cuve interne	cuve externe
Stabilité	$\sigma < 10^{-9}$ ($\tau > 0,2$)	$\left\{ \begin{array}{l} \sigma \approx 10^{-10} \text{ } (\tau=1) \\ \sigma=9 \times 10^{-12} \text{ } (\tau=100) \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \sigma \approx 10^{-11} \text{ } (\tau=1) \\ \sigma=5 \times 10^{-13} \text{ } (\tau=100) \end{array} \right.$
Reproductibilité	$\pm 4 \times 10^{-9}$	$\pm 2 \times 10^{-10}$	$\pm 2 \times 10^{-11}$
Exactitude	$\pm 4 \times 10^{-9}$	$\pm 2 \times 10^{-11}$	$\pm 5 \times 10^{-11}$

L'effet de pression est - 5 kHz par pascal entre 2,7 et 23 Pa et l'effet d'amplitude est inférieur à 10^{-11} . On a aussi mesuré les longueurs d'onde des radiations suivantes :

$$^{127}\text{I}_2, 43-0, \quad P(13), \text{ F-J} = 5 \quad : \quad \lambda = 514\,673\,469 \pm 5 \text{ fm}$$

$$^{127}\text{I}_2, 43-0, \quad P(13), \text{ F-J} = 0 \quad : \quad \lambda = 514\,673\,522 \pm 5 \text{ fm}$$

$$^{129}\text{I}_2, (53\pm 1)-1, \text{ R}(67), \text{ F-J} = -7 \quad : \quad \lambda = 514\,674\,653 \pm 5 \text{ fm}$$

Au Laboratoire de Physique des Lasers (Villetaneuse, France), on a stabilisé un laser à argon à 582,49 THz sur des transitions de $^{127}\text{I}_2$; la stabilité est meilleure que 3×10^{-14} avec $10 < \tau < 50$ secondes et la répétabilité est de l'ordre de 1 kHz soit $1,5 \times 10^{-12}$; on estime que l'écart par rapport à la fréquence théorique est inférieur à 5 kHz.

D'autres études sont poursuivies (NPL) sur des lasers à

* Trois erreurs typographiques qui figuraient dans *Procès-Verbaux CIPM*, 46, 1978, p. A 9 ont été corrigées.

krypton-argon ionisé asservis sur l'absorption saturée de l'iode.

Avec des lasers à He-Xe stabilisés sur H_2CO , on a mesuré (Tokyo Institute of Technology, cité par Shimoda) une stabilité $\sigma = 5 \times 10^{-12}$ avec $\tau = 20$ secondes ; on a aussi déterminé le coefficient d'absorption linéique α et l'élargissement γ (demi-largeur à mi-hauteur) de la raie d'absorption à $\lambda = 3,51 \mu m$ de H_2CO : $\alpha = (0,047 m^{-1} \cdot Pa^{-1}) p$ et $\gamma = 87 kHz + (110 kHz/Pa) p$, où p est la pression de H_2CO .

2.3 - Lasers divers

Les fréquences de nombreuses raies d'un laser à N_2O ont été mesurées par "hétérodynage" avec des fréquences connues d'un laser à CO_2 dans une diode au tungstène-nickel (NRC).

La PTB a mesuré les fréquences de six raies lasers dans l'infrarouge lointain entre 239 GHz et 762 GHz par mélange avec des harmoniques d'un klystron à 50 GHz et 70 GHz dans une diode à point de contact W-Ni. On prévoit l'utilisation de ces lasers comme oscillateurs de transfert pour les mesures de fréquence dans l'infrarouge.

2.4 - Lasers à colorants

Un domaine d'étude qui paraît prometteur pour la métrologie est celui des lasers à colorants. Les travaux sont en cours sur ce sujet dans plusieurs laboratoires. La stabilisation de tels lasers par absorption saturée de l'iode est étudiée au NPL et au LHA (cité par l'INM). Un laser accordable et continu dont la fréquence peut varier continuellement sur 5 GHz a été réalisé (LHA) : sa stabilité est $1,5 \times 10^{-12}$ avec $\tau = 100$ secondes et la largeur spectrale est 250 kHz. Au NBS, on a asservi un laser à colorant sur une cavité Perot-Fabry elle-même asservie sur un laser à CH_4 : la stabilité est 300 Hz avec $\tau = 300$ secondes ; on utilise un système d'asservissement très rapide à cristal de KDP. Au JILA, on étudie pour ces lasers à colorants des étalons de fréquence fondés sur des transitions à deux photons entre niveaux de Rydberg.

Avec les lasers à colorants, un sérieux problème est posé par leur très grand domaine spectral. En effet, il n'est pas très facile de séparer les quelques 50 000 profils Doppler qui peuvent exister dans une "fenêtre" de longueur d'onde de 50 nm. Un interféromètre de type Michelson à balayage automatique donnant rapidement les valeurs des longueurs d'onde (cinq

lectures de sept chiffres significatifs par seconde) a été construit pour l'étalonnage de ces lasers réglables, continus ou pulsés ("lambdamètre", JILA).

Au sujet des lasers à colorants, A.H. Cook pense que s'il devenait possible d'asservir la fréquence par référence à un étalon de fréquence beaucoup plus basse, il se pourrait que l'on ait la possibilité d'établir, sinon une source de fréquence connue réglable de façon continue, du moins une source que l'on pourrait accorder sur un grand nombre de fréquences connues distinctes, multiples de la fréquence de l'étalon. Une telle source simplifierait grandement la mesure des longueurs. L'IMM conseille également la poursuite des études pour améliorer la stabilité des lasers à colorants.

Il semble enfin que, dans le proche infrarouge, les lasers à centres colorés dans les halogénures alcalins (Université Technique de Hanovre, cité par le NBS) présentent des domaines de réglage comparables à ceux des lasers à colorants, avec une bonne stabilité de fréquence intrinsèque (mieux que 100 kHz).

3. ÉTUDES DE NOUVELLES MÉTHODES

Le NRC étudie une méthode d'asservissement fondée sur l'emploi de trois fréquences distinctes appliquées à trois éléments séparés de la cavité laser. On expérimente de nouveaux modes de stabilisation tels que la dispersion saturée (PTB), les résonances de Ramsey obtenues par la méthode des champs séparés (IMM, NBS, PTB, JILA). On a aussi envisagé de pouvoir apporter, a posteriori, une correction à la fréquence et de stabiliser l'intensité d'un laser au moyen d'une méthode opto-acoustique utilisant une cellule de Bragg (NBS-JILA). D'autre part, plusieurs améliorations de l'appareillage sont envisagées. Mais, d'après l'étude théorique du JILA, il apparaît que les possibilités des lasers à absorption saturée sont, de toutes façons, limitées : on a identifié un déplacement, en fonction de l'intensité, de la distribution de la vitesse effective des absorbants qui contribuent à l'absorption saturée. Cet effet, par l'intermédiaire de la correction Doppler de second ordre, limite fondamentalement les performances des dispositifs à absorption saturée à cellule. Par exemple, avec CH_4 , le déplacement relatif par effet Doppler du second ordre, à température ambiante, est de 2×10^{-12} , avec une incertitude estimée de 10 % ; la limite correspondante de 2×10^{-13} est très regrettable puisqu'on a démontré qu'on peut obtenir une stabilité

dix fois meilleure avec un temps de mesure de 10 secondes ou même 3×10^{-14} sur 300 secondes avec un appareil à ultra-haute résolution. On doit diriger les efforts sur les absorbants à molécules lourdes, sur les systèmes à réduction de vitesse, tels que les pièges à ions, sur les dispositifs utilisant des interactions sélectives en vitesse, tels que les dispositifs à interaction longitudinale, et sur les techniques de franges de Ramsey.

On étudie la possibilité que des transitions à deux photons à des niveaux atomiques métastables dans un jet atomique de bismuth puissent fournir des résonances intéressantes pour l'asservissement de fréquences lasers ; le système $(6p)^3 2P_{3/2} \leftarrow (6p)^3 4S_{3/2}$ à $\lambda = 6030,508 \text{ \AA}$ est en cours d'expérimentation (NBS-JILA). Les transitions du néon libérées de l'effet Doppler par absorption à deux photons sont à l'étude (Ecole Normale Supérieure, Paris).

Bien que le "lambdamètre" soit un instrument très pratique pour mesurer les longueurs d'onde de lasers à colorants, on peut avoir besoin de déterminations plus exactes. Pour répondre à ce problème, on est en train d'explorer l'idée que des transitions à deux photons aux niveaux de Rydberg de métaux alcalins peuvent fournir un étalonnage précis (NBS-JILA).

Les études théoriques faites par W.G. Harter *et al.* ont fait grandement progresser l'analyse générale des spectres de molécules hautement symétriques. Il en résultera très probablement une pléthore d'étalons secondaires de longueurs d'onde dans l'infrarouge (NBS-JILA).

Au NBS, on a fait des travaux préparatoires sur l'absorption saturée de Faraday dans une cuve à Ca ; on projette d'appliquer la méthode de Ramsey des champs séparés sur un jet atomique de Ca. Dans ce laboratoire, on a aussi étudié les lasers à dimères pompés optiquement, avec l'idée que l'absence de décharge peut permettre un fonctionnement laser sans aucune perturbation due au "bruit". L'action laser continue a été confirmée dans Na_2 et I_2 et démontrée dans K_2 et Li_2 .

Une expérience ouvrant d'intéressantes perspectives pour l'avenir proche a été faite au NBS où l'on a pu mesurer directement la fréquence de 197 THz d'un laser à $\lambda = 1,5 \text{ \mu m}$; la fréquence de cette radiation a été doublée dans un cristal non linéaire, produisant un faisceau rouge visible. Ainsi, on a synthétisé une radiation visible directement reliée à l'étalon de temps.

4. CONCLUSIONS

Tout d'abord, il est certain que les étalons secondaires (I_2 et CH_4) recommandés par le CCDM en 1973 sont actuellement d'une exactitude nettement suffisante pour la métrologie des longueurs (NML, NPL, INM, ASMW). Partant de cette constatation et aussi du fait que les étalons possibles sont de plus en plus nombreux, une des opinions la plus largement exprimée est que, de ce point de vue, il n'y a pas urgence à changer la définition du mètre. Il conviendrait de continuer les études entreprises :

1° afin de découvrir la référence idéale de longueur d'onde en expérimentant de nouveaux principes de lasers et de stabilisation, par exemple le pompage optique, l'excitation de Ramsey à deux photons, les jets atomiques, la dispersion saturée, etc. ;

2° afin de pouvoir extrapoler sa valeur des conditions de fonctionnement à celle de l'état "non perturbé" par la recherche théorique permettant de bien comprendre les causes des effets perturbateurs observés expérimentalement ;

3° afin de pouvoir mesurer sa fréquence par rapport à l'étalon primaire au césium (A.H. Cook, NML, NPL, NRC, JILA, NBS, PTB, IMM, ASMW). A ce sujet, on s'accorde à penser qu'un étalon émettant dans le spectre visible serait préférable.

D'autre part, il apparaît que les comparaisons de lasers à hélium-néon ont été bénéfiques et qu'elles devraient être étendues à d'autres lasers. On demande aussi la poursuite des études concernant les méthodes et les moyens de transfert de l'unité de longueur de définition aux étalons secondaires, y compris l'étude de problèmes tels que la réalisation d'étalons matériels à traits et à bouts de haute précision et stables dans le temps, et le perfectionnement des méthodes de mesure des longueurs d'onde laser (IMM).

Parmi ceux qui estiment que la situation actuelle peut se prolonger sans inconvénients encore plusieurs années, certains pensent qu'il y aurait plusieurs avantages à fonder l'unité de longueur sur le même système physique que celui utilisé pour la définition de l'intervalle de temps, le plus évident des avantages étant que cela conduirait à fixer la valeur de c , indépendamment d'éventuels changements de la base physique commune des unités ou de futures améliorations des mesures ; il ne serait pas nécessaire d'attendre que des techniques nouvelles de mesure directe de fréquences dans le visible voient le jour pour

envisager une nouvelle définition du mètre fondée sur l'équation $\lambda = c/f$ (NPL) ; d'autres font remarquer que l'adoption d'une valeur de c ne résoudrait cependant pas tous les problèmes impliqués : toute réalisation de l'unité de longueur par une longueur d'onde d'un laser stabilisé serait limitée non seulement par son exactitude propre mais, en plus, par l'incertitude de la mesure par rapport à l'étalon primaire (PTB).

J. Terrien est d'avis qu'il ne faut plus attendre pour changer la définition du mètre et que la forme en a été explicitée par le Comité Consultatif des Unités (CCU) en 1974* . La fréquence de la transition étant fixée par convention dans la définition de la seconde, c se trouve fixé par cette définition du mètre. Toute radiation dont la fréquence ν est mesurable en hertz sera un étalon de longueur d'onde dans le vide de valeur c/ν . Au contraire, si le mètre était défini par la longueur d'onde d'une radiation, les progrès ultérieurs rendraient cette définition insuffisante. De plus, on aurait laissé échapper l'occasion de fixer définitivement la valeur de c .

Dans sa réponse, le BIPM résume les quatre solutions possibles au problème du changement de la définition du mètre avec leurs avantages et leurs inconvénients :

- statu quo,
- définition utilisant une longueur d'onde dans le visible (ou proche du visible),
- définition utilisant la longueur d'onde de la radiation du césium 133,
- définition utilisant le trajet parcouru par la lumière pendant une durée spécifiée.

Souhaitant laisser la discussion largement ouverte, le BIPM évite de prendre position. Pour éclairer d'une façon plus nette le CCU et le CIPM, il pose aux membres du CCDM une question supplémentaire plus précise, en trois points (lettre du 3 mars 1978) :

a) Vous semble-t-il souhaitable qu'une nouvelle définition du mètre soit proposée par la prochaine Conférence Générale des Poids et Mesures en 1979 ?

b) La définition proposée par le CCU en 1974* , c'est-à-dire fondée sur l'étalon au césium en fixant implicitement une valeur définitive de c , reçoit-elle votre agrément ? Sinon, quelle serait votre proposition ?

* CCU, 4^e session, 1974, p. U 11 et U 12 : "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".

c) Si votre réponse est positive pour le point a, seriez-vous d'accord pour la convocation du CCDM au cours du deuxième semestre de 1978 ?

Douze réponses sont parvenues des quatorze destinataires.

A la question a, trois réponses sont "oui" (NBS, NRC, JILA), six réponses sont "non" (NPL, PTB, ASMW, NRLM, IMM, K. Shimoda) ; la réponse de L. Frenkel semble favorable ; le NML et A.H. Cook, sans être partisans d'une action rapide, ne s'opposeraient pas à un changement.

En ce qui concerne la question b, trois réponses sont nettement en faveur de la définition envisagée par le CCU (NML, NPL, NRC). Les autres réponses peuvent être résumées ainsi :

Le NBS recommande que le mètre soit défini par la distance parcourue dans le vide par la lumière en $(299\ 792\ 458)^{-1}$ seconde. L'ASMW a la même opinion.

Le JILA pense qu'une possibilité intéressante serait une définition fondée sur la formule $\lambda = c/f$, où λ est la longueur d'onde en mètre de la radiation cohérente (visible) dont la fréquence est f et où c a la valeur conventionnellement adoptée. A.H. Cook donne un avis très voisin du précédent.

K. Shimoda ne croit pas à la supériorité définitive de l'étalon à césium sur des étalons à fréquence optique et propose la définition suivante : "Le mètre est la longueur égale à la longueur d'onde dans le vide d'une radiation électromagnétique dont la fréquence est 299 792 458 Hz".

L. Frenkel propose que l'unité de longueur L soit égale à la distance parcourue par la lumière en 1 seconde, que l'étalon pratique de longueur, le mètre, soit $1\text{ m} = (299\ 792\ 458,0)^{-1} L$ et qu'une liste de longueurs d'onde soit publiée.

La PTB préférerait, tout d'abord, une définition fondée sur la longueur d'onde d'une radiation visible d'un laser.

L'opinion du NRLM est que les recherches des différents laboratoires ont montré que des améliorations étaient encore possibles dans la réalisation des étalons de fréquence.

Quant à la nécessité de réunir le CCDM au cours du deuxième semestre de 1978, quatre membres seulement sont d'accord (NBS, PTB, JILA, A.H. Cook). D'autres membres suggèrent que la discussion soit poursuivie par correspondance.

(20 juin 1978)

ANNEXE M 3

Comparaison internationale d'étalons à traits

Rapport du BIPM sur les premiers résultats

La comparaison internationale de mesure de règles divisées organisée par le BIPM en juillet 1976 se poursuit.

Les deux règles (N° 12924 de 1 m et N° 16806 de 0,5 m), précédemment étudiées au BIPM, ont été étudiées, au cours d'un premier circuit :

- au NML (de juillet 1976 à janvier 1977),
- au NRC (respectivement de février à août et de février à octobre 1977),
- au NBS (respectivement en août-septembre et en novembre 1977),
- au NRLM (respectivement d'octobre 1977 à mars 1978 et de décembre 1977 à mai 1978),
- au BIPM (respectivement en avril-mai et en juin-juillet 1978).

Pour les deux règles, la valeur trouvée au BIPM pour le coefficient de dilatation à 20 °C confirme le résultat obtenu antérieurement (respectivement en avril-mai 1968 et en avril-mai 1975). En revanche, les valeurs trouvées tant pour la longueur totale de la division principale que pour la position de certains traits s'écartent notablement des résultats obtenus avant le début de la circulation (respectivement en

mai 1976 et en mars-avril 1975). Les résultats étant particulièrement médiocres pour la règle N° 16806, nous avons proposé d'interrompre la circulation de cette règle et de poursuivre la comparaison internationale en cours en utilisant seulement la règle N° 12924.

Un second circuit a été organisé : il concerne les laboratoires suivants : NPL, ASMW, IMM et PTB.

A ce jour (28 mai 1979), la règle N° 12924 a été étudiée :

- au NPL (d'octobre à décembre 1978),
- à l'ASMW (de janvier à mars 1979).

Après achèvement du second circuit et étude au BIPM de la règle N° 12924, un troisième circuit sera organisé ; il concernera l'IMGC (Italie), l'OFM (Suisse), le NIM (Chine) et le NML qui souhaite recommencer ses mesures.

A l'heure actuelle, nous disposons des résultats obtenus par les laboratoires qui ont participé au premier circuit, ainsi que des résultats obtenus par le NPL.

Ces résultats sont résumés dans les graphiques suivants. Afin de ne pas divulguer, avant la fin de la comparaison, les valeurs obtenues par les laboratoires participants, nous avons représenté les écarts de chaque laboratoire par rapport à la moyenne.

Ces graphiques concernent, pour les deux règles, le coefficient de dilatation à 20 °C, la longueur de l'intervalle principal et, sous l'appellation "étalonnage", la position de chaque trait étudié par rapport à une échelle idéale s'appuyant sur les traits extrêmes de l'intervalle principal. (Toutefois, pour le millimètre supplémentaire divisé en dixièmes de millimètre de la règle N° 12924, nous avons représenté sur un même graphique, la position de chaque subdivision et la position de l'extrémité droite de cet intervalle millimétrique par rapport à son extrémité gauche.)

Les erreurs systématiques telles que celles qui affectent la détermination de l'indice de réfraction de l'air et de la température interviennent directement sur la valeur de l'intervalle principal mais sont sans influence sur l'étalonnage pour lequel n'intervient pratiquement que la manière dont les microscopes "voient" les traits. Par exemple, on remarquera que la valeur de l'intervalle principal de la règle N° 12924 indiquée par l'un des laboratoire (NRLM) s'écarte sensiblement

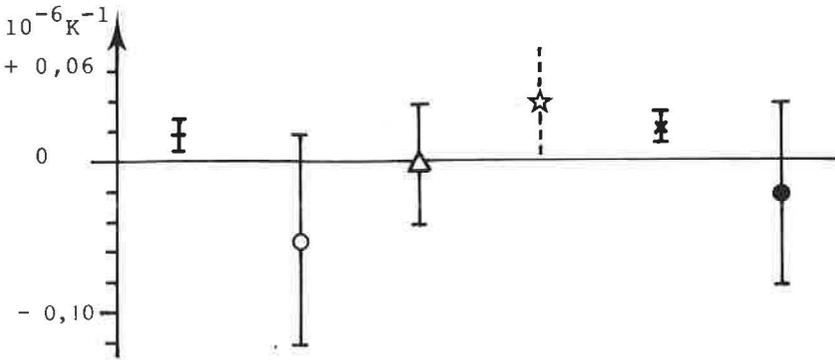
de la moyenne (Fig. 2), alors que les valeurs données par ce laboratoire pour l'étalonnage sont comparables aux autres (Fig. 3 et 4). D'autre part, l'examen des figures 5 et 6 suggère que les traits extrêmes de la règle N° 16806 sont "vus" d'une façon différente des autres laboratoires par le microscope du NRC : un écart de l'ordre de 0,30 μm apparaît par rapport aux autres laboratoires.

D'une façon générale, il ressort que les résultats sur la règle de 0,5 m à "traits vibrés" N° 16806 sont extrêmement dispersés ce qui justifie notre décision, prise après le premier circuit de ne plus faire participer, au moins temporairement, cette règle à la comparaison.

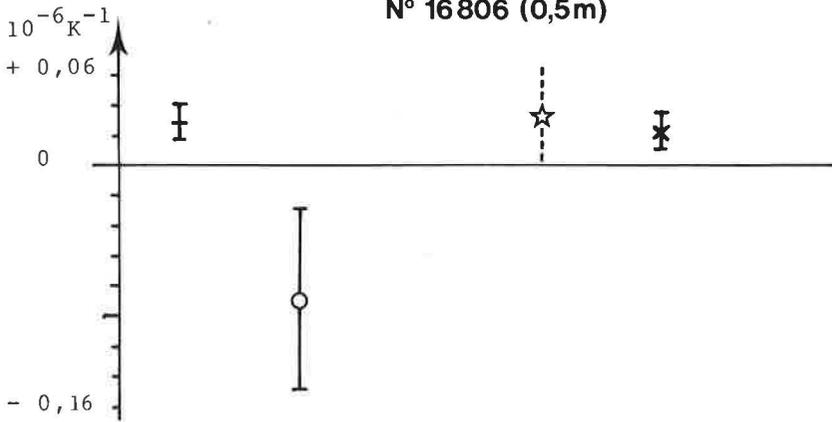
Même si l'on ne prend en considération que les mesures faites sur la règle de 1 m N° 12924, les résultats sont assez décevants. Il est vrai que cet étalon n'est pas d'une qualité exceptionnelle, en particulier du point de vue de sa planéité. Il est vrai aussi que l'étalon n'a pas été transporté à la main d'un laboratoire à l'autre ; aussi soigné que soit l'emballage, on peut craindre les chocs du voyage. Néanmoins, les écarts entre laboratoires montrent que les mesures pratiques de longueur sont loin d'atteindre les limites permises par les étalons de longueur d'onde et que des progrès devraient pouvoir intervenir dans ce domaine. C'est le but de telles comparaisons.

(Juin 1979)

N° 12924 (1m)

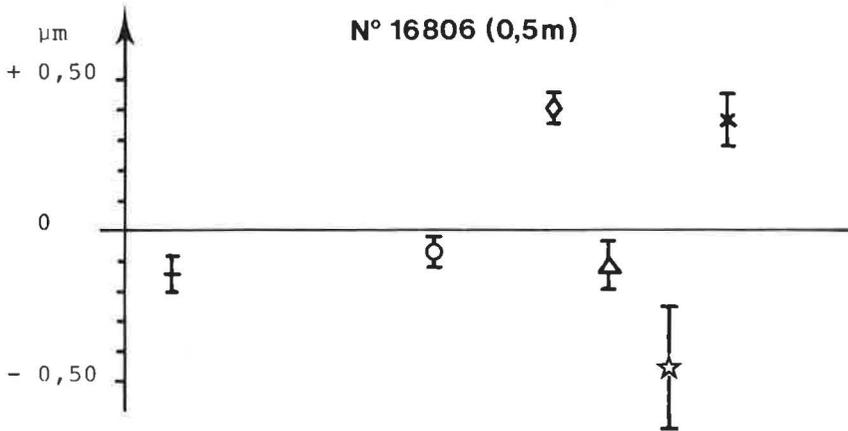
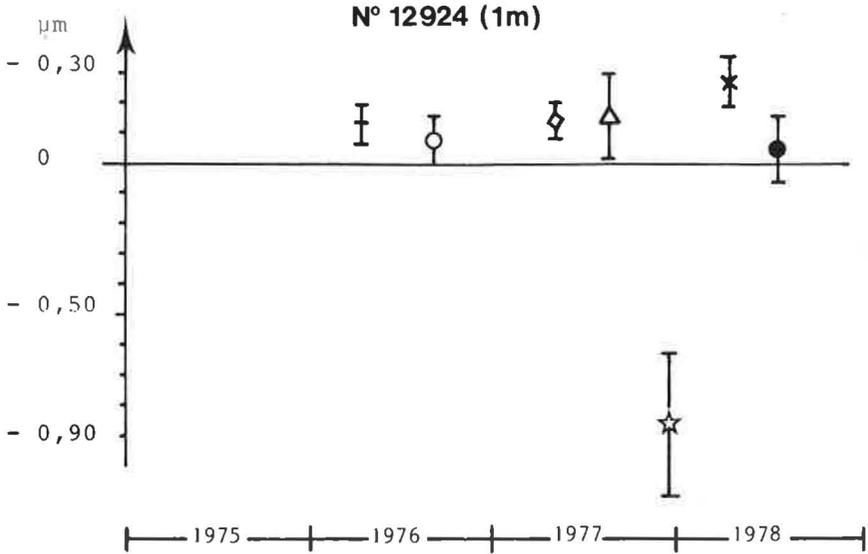


N° 16806 (0,5m)



✦ BIPM ○ NML △ NBS ☆ NRLM ● NPL

Fig. 1.- Coefficient de dilatation α_{20} : (Labo.)-(Moy.).
Les résultats sont donnés dans l'ordre chronologique
sans respecter l'échelle de temps.



- + BIPM 1976 × BIPM 1978 ○ NML ◇ NRC △ NBS
☆ NRLM ● NPL

Fig. 2.- Intervalle principal : (Labo.)-(Moy.).

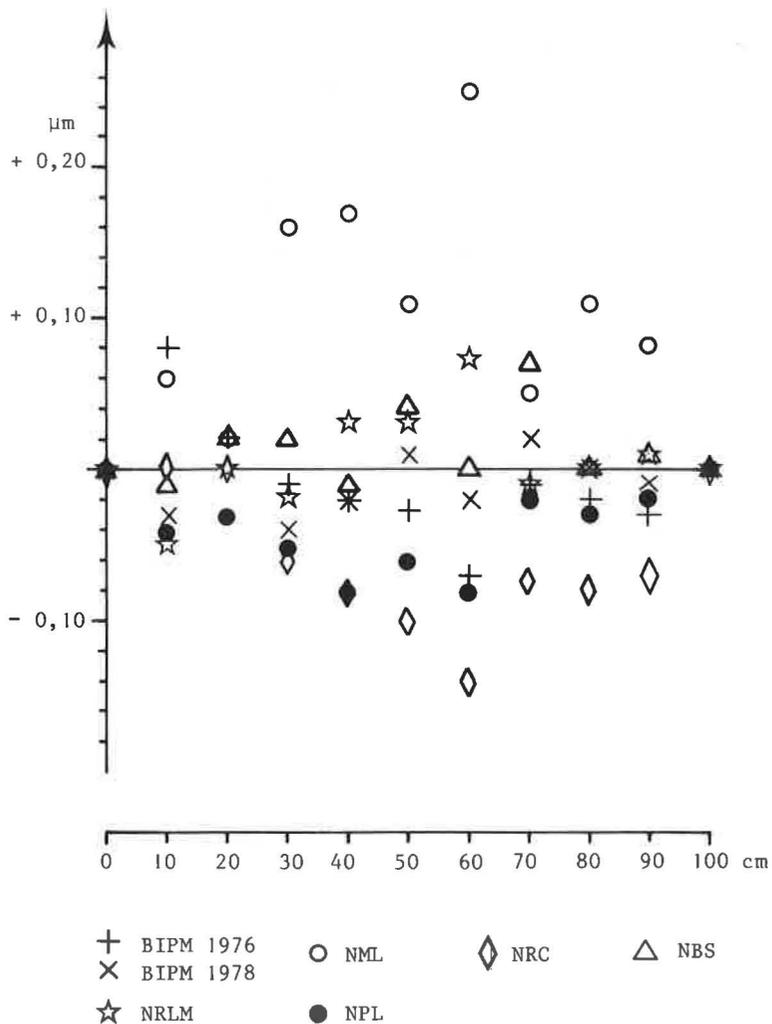
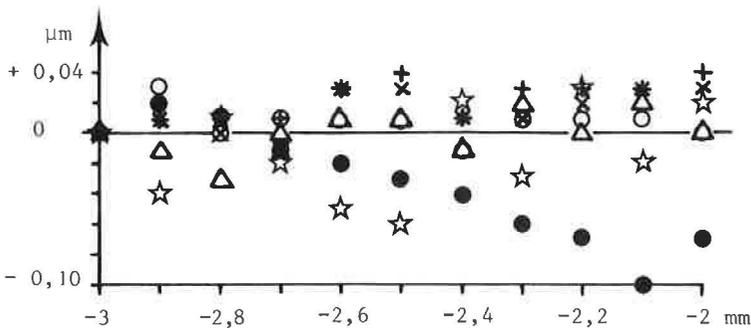
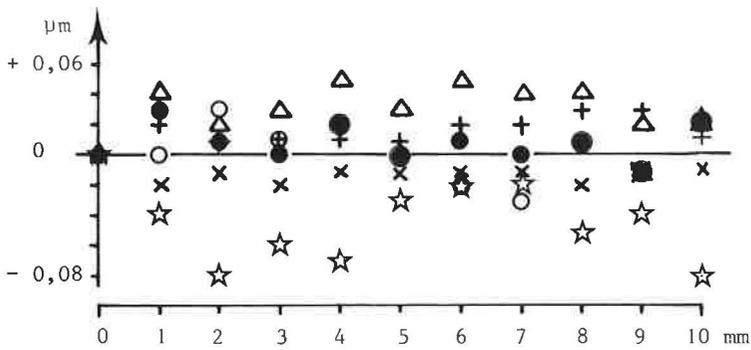
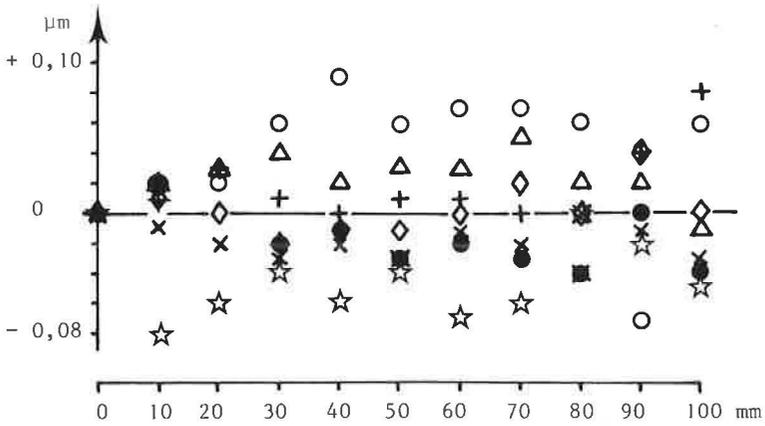
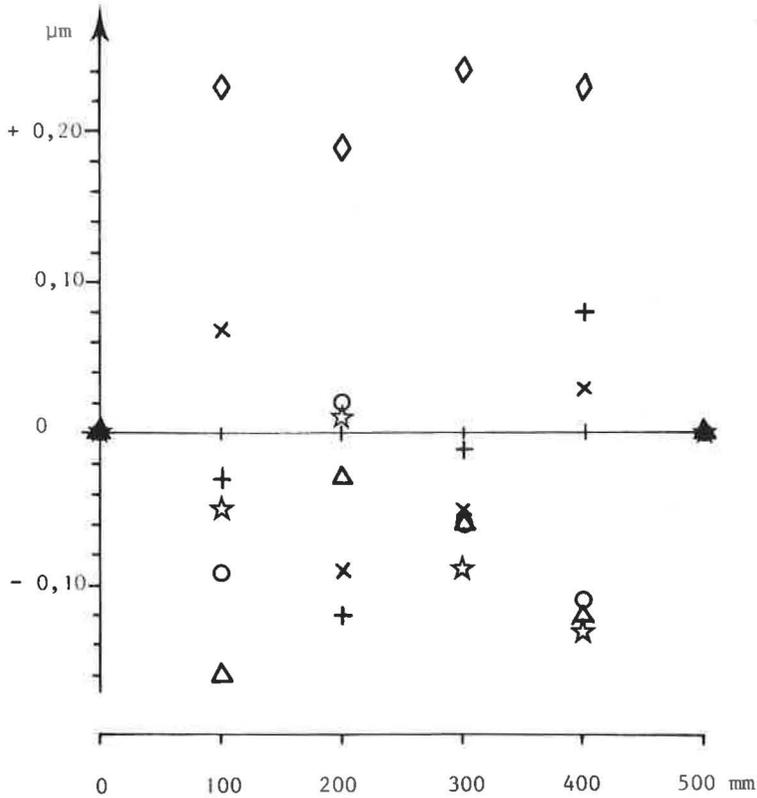


Fig. 3.- Règle N° 12924 : étalonnage des décimètres (Labo.)-(Moy.)



+ BIPM 1976 o NML ◊ NRC △ NBS ☆ NRLM ● NPL
 x BIPM 1978

Fig. 4.- Règle N° 12924 : étalonnage des premiers centimètres.



+

x

BIPM 1975

BIPM 1978

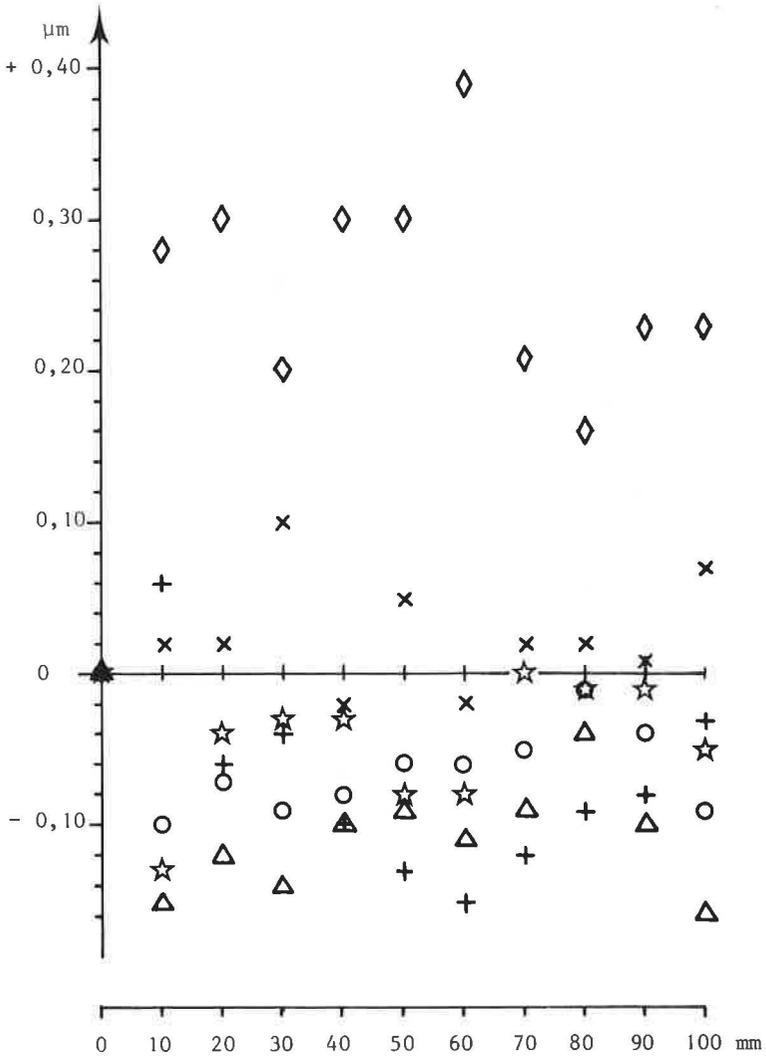
○ NML

◇ NRC

△ NBS

☆ NRLM

Fig. 5.- Règle N° 16806 : étalonnage des décimètres (Labo.)-(Moy.)



+ BIPM 1975 ○ NML ◇ NRC △ NBS ☆ NRLM
× BIPM 1978

Fig. 6.- Règle N° 16806 : étalonnage des premiers centimètres (Labo.)-(Moy.)

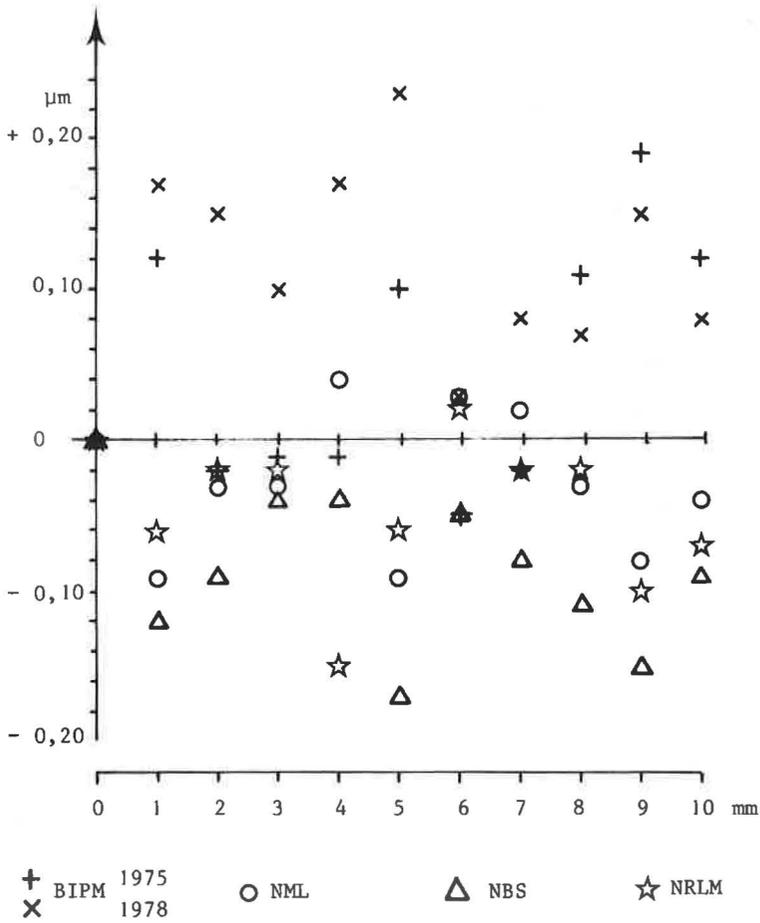


Fig. 7.- Règle N° 16806 : étalonnage des premiers millimètres (Labo.)-(Moy.)

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DU MÈTRE 6^e Session (1979)

	Pages
Notice historique sur les organes de la Convention du Mètre	v
Liste des membres	vii
Ordre du jour	x
Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par W. R. C. Rowley.....	M1
Progrès effectués depuis 1973 sur l'asservissement des lasers : lasers à He-Ne asservis sur l'absorption saturée de l'iode à 633 nm et à 612 nm, et du méthane à 3,39 μm ; lasers à CO_2 de 9 à 11 μm ; lasers à He-Xe à 3,51 μm ; lasers à argon ionisé à 515 nm	3
Mesures de fréquence et de longueur d'onde: Mesures de fréquence de la radiation du laser à He-Ne asservi sur le méthane à 3,39 μm ; mesures de fréquences optiques. Mesures interférométriques du rapport des longueurs d'onde des radiations du laser à CO_2 et du laser à 633 nm, des radiations laser à 3,39 μm et à 633 nm; mesures interférométriques de la longueur d'onde de la radiation du laser à He-Ne à 633 nm par comparaison à celle du ^{86}Kr , de la longueur d'onde de la radiation à 515 nm du laser à argon ionisé et de la radiation à 612 nm du laser à He-Ne	5
Déclaration du CCDM au sujet des radiations à 515 nm du laser à argon ionisé et 612 nm du laser à He-Ne	8
Comparaisons d'étalons à bouts, à traits et d'étalons d'angle : Étalons à bouts (Exposé des résultats de mesures faites dans quatre laboratoires)	9
Étalons à traits (Compte rendu des premiers résultats de la comparaison internationale en cours; recherches à faire pour améliorer la concordance des mesures)	9
Adoption de la Recommandation M 1	10
Étalons d'angle (Discussion de l'opportunité pour le CCDM d'accepter la responsabilité de certaines études sur les étalons d'angle. Projet d'organisation par le NRLM d'une comparaison de tels étalons)	10

Définition du mètre (Résumé des réponses au questionnaire demandant l'opinion des membres du CCDM. Raisons de changer la définition actuelle. Examen de deux types de formulation d'une nouvelle définition. Fixation du programme futur: nécessité de diffusion des résultats obtenus, prochaine session en 1982. Discussion d'une formulation suffisamment précise mais compréhensible par tous. Adoption de la Recommandation M 2)	10
Divers (Possibilités de se procurer des tubes à plasma pour les lasers à He-Ne asservis sur l'iode)	14
Recommandations présentées au Comité International des Poids et Mesures :	
<i>Recommandation M 1 (1979) (Étalons à traits)</i>	15
<i>Recommandation M 2 (1979) (Sur une nouvelle définition du mètre)</i>	16

Annexes

M 1. <i>Documents de travail présentés à la 6^e session du CCDM</i>	18
M 2. <i>Consultation préalable par correspondance</i>	
A — Questionnaire adressé par le BIPM aux membres du CCDM le 28 octobre 1977	27
B — Questionnaire complémentaire envoyé par le BIPM aux mêmes destinataires le 3 mars 1978	30
C — <i>État d'avancement des études sur les lasers asservis et définition du mètre</i> (Rapport du BIPM d'après les réponses aux deux questionnaires)	31
M 3. <i>Comparaison internationale d'étalons à traits</i> (Rapport du BIPM sur les premiers résultats)	46

IMPRIMERIE DURAND

28600 LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1979, n° 3564

ISBN 92-822-2058-3

ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 1980-02-20