

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DU MÈTRE

SESSION DE 1970

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

COMITÉ CONSULTATIF
POUR
LA DÉFINITION DU MÈTRE

4^e SESSION — 1970
(14-16 septembre)



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Pavillon de Breteuil, F 92-SÈVRES, France

Dépositaire: OFFILIB, 48 rue Gay-Lussac, F 75-Paris 5

AVERTISSEMENT HISTORIQUE

Le Bureau International des Poids et Mesures 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 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 (1).

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 fondamentales.

Le Bureau International fonctionne sous la surveillance exclusive d'un *Comité International des Poids et Mesures*, placé lui-même sous l'autorité d'une *Conférence Générale des Poids et Mesures*.

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 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.

(1) Au 31 décembre 1970, quarante États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne, Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Canada, Chili, Corée, Danemark, Dominicaine (Rép.), Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Irlande, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République Arabe Unie, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Vénézuéla, 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 C.I.P.M.*, 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, ainsi que de membres individuels désignés également par le Comité International. Ces Comités tiennent leurs sessions à des intervalles irréguliers; ils sont actuellement au nombre de sept :

1. Le *Comité Consultatif d'Électricité*, créé en 1927.
2. Le *Comité Consultatif de Photométrie*, créé en 1933 (de 1930 à 1933 le Comité précédent s'est occupé des questions de photométrie).
3. Le *Comité Consultatif de Thermométrie*, créé en 1937.
4. Le *Comité Consultatif pour la Définition du Mètre*, créé en 1952.
5. Le *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde*, créé en 1956.
6. Le *Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants*, créé en 1958.
7. Le *Comité Consultatif des Unités*, 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).

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.

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 dans le monde.

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 divers organismes issus de la Convention du Mètre.

Comité International des Poids et Mesures

| | | |
|-------------------|-----------------------|------------------|
| <i>Secrétaire</i> | <i>Vice-Président</i> | <i>Président</i> |
| J. DE BOER | J. V. DUNWORTH | J. M. OTERO |

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DU MÈTRE

Président

J. M. OTERO, Président, Centro Nacional de Energia Nuclear « Juan Vigon », Ciudad Universitaria, *Madrid 3*.

Membres

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES [N.R.C.], *Ottawa* (K. M. BAIRD, Head, Optical Physics Section).

DEUTSCHES AMT FÜR MESSWESEN UND WARENPRÜFUNG [D.A.M.W.], *Berlin*.

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

JOINT INSTITUTE FOR LABORATORY ASTROPHYSICS [J.I.L.A.], *Boulder* (J. L. HALL, Physicist).

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [N.B.S.], *Washington* (K. G. KESSLER, Chief, Optical Physics Division; J. A. SIMPSON, Deputy Chief, Optical Physics Division).

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [N.P.L.], *Teddington* (W.R.C. ROWLEY, Principal Scientific Officer).

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY [N.R.L.M.], *Tokyo* (Y. SAKURAI, Chief of 1st Division).

NATIONAL STANDARDS LABORATORY [N.S.L.], *Chippendale* (C. F. BRUCE, Senior Principal Research Scientist).

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [P.T.B.], *Braunschweig* (E. ENGELHARD, Assistant du Directeur).

B. EDLÉN, Fysiska Institutionen, *Lund*.

L. FRENKEL, National Aeronautical and Space Administration, *Cambridge* (États-Unis).

K. SHIMODA, University of Tokyo, *Tokyo*.

Y. VÄISÄLÄ, Professeur à l'Université, *Turku**

Le Directeur du Bureau International des Poids et Mesures [B.I.P.M.], *Sèvres* (J. TERRIEN).

* Le Bureau International des Poids et Mesures a appris avec un profond regret le décès du Prof. Y. VÄISÄLÄ survenu le 21 juillet 1971.

ORDRE DU JOUR DE LA SESSION

1. Travaux sur la radiation du krypton 86 de la définition du mètre.
 2. Rapport des instituts métrologiques nationaux sur le passage à la définition du mètre adoptée en 1960.
 3. Travaux sur les radiations étalons secondaires de longueur d'onde recommandées par le C.I.P.M. en 1963; travaux sur d'autres radiations analogues susceptibles d'être recommandées par le C.I.P.M.
 4. Lasers utilisés en métrologie.
 5. Radiations de très faible largeur spectrale obtenues par absorption saturée; facteurs qui conditionnent la stabilité de leur longueur d'onde.
 6. Méthodes et appareils :
 - a) pour l'étude des qualités métrologiques des étalons de longueur d'onde;
 - b) pour la mesure de la longueur des étalons à bouts, des étalons à traits, et des déplacements.
 7. Mesures comparatives internationales de longueur.
 8. Échanges de vues sur l'éventualité d'un changement de la définition de l'unité de longueur, faisant intervenir par exemple les lasers ou la vitesse de la lumière.
 9. Questions diverses.
-

4^e SESSION (1970)

RAPPORT

AU

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (C.C.D.M.) a tenu sa quatrième session au Pavillon de Breteuil, à Sèvres, les lundi 14, mardi 15 et mercredi 16 septembre 1970.

Étaient présents : Mr OTERO, président; MM. BAIRD, BRUCE, ENGELHARD, HALL, KESSLER, ROWLEY, SAKURAI, SIMPSON, TERRIEN.

Assistaient également aux séances : Mr MARÉCHAL, membre du Comité International; MM. GIACOMO, sous-directeur du Bureau International; CARRÉ, LECLERC, SAKUMA, HAMON, CHARTIER (Bureau International).

Excusés : MM. EDLÉN, FRENKEL, SHIMODA, VÄISÄLÄ, membres nominativement désignés; Institut de Métrologie Tchécoslovaque (Bratislava), invité.

Absents : Deutsches Amt für Messwesen und Warenprüfung, Berlin; Institut de Métrologie D.I. Mendéléev, Leningrad.

Les divers points de l'ordre du jour proposé avaient fait l'objet d'un questionnaire préalable envoyé à tous les membres du C.C.D.M. Les réponses à ce questionnaire, qui avaient également été distribuées à tous les membres, ont permis de consacrer la majeure partie du temps aux discussions ⁽¹⁾.

Le Président ouvre la session en souhaitant la bienvenue aux participants.

Mr Baird (assisté de Mr Hamon comme secrétaire) est nommé rapporteur.

Mr Terrien fait part de deux propositions d'adjonctions au projet d'ordre du jour : l'une (N.R.C.) concernant le rôle éventuel du C.C.D.M.

⁽¹⁾ On trouvera à l'Annexe M 2 le détail des réponses à ce questionnaire, regroupées point par point; plusieurs documents joints aux réponses font l'objet des Annexes M 3 à M 14. Le présent rapport résume les grandes lignes de ces Annexes. Les noms des laboratoires cités entre parenthèses renvoient à l'Annexe M 2.

pour la mesure de la vitesse de la lumière, l'autre (P.T.B., N.B.S.) concernant les limites de l'exactitude des mesures de longueur.

Après une brève discussion, ces deux questions sont ajoutées respectivement aux points 8 et 6. L'examen des différents points de l'ordre du jour est ensuite abordé.

1. Travaux sur la radiation du krypton 86 de la définition du mètre

Tous les laboratoires qui ont répondu au questionnaire utilisent des lampes à krypton 86 dans les conditions recommandées pour reproduire la radiation étalon.

La *dissymétrie* du profil spectral de la radiation étalon a été confirmée par plusieurs laboratoires (N.P.L., N.R.C., N.S.L.) ou est en cours d'étude (Kessler). Cette dissymétrie, dont aucune interprétation satisfaisante n'a encore pu être donnée, contribue à la limitation de l'exactitude des mesures de longueur à quelques 10^{-9} . La quantité de krypton 84 présente dans les lampes étudiées est insuffisante pour expliquer la dissymétrie (Engelhard); il faudrait que l'émission de cet isotope soit avatagée, par exemple par cataphorèse, pour expliquer la dissymétrie que l'on observe encore avec du krypton 86 à 99,97 % de pureté (Baird). Des effets asymétriques dus aux collisions ont été signalés dans d'autres cas (déplacement du « Lamb-dip » par rapport au profil Doppler: Sixth International Conference on Quantum Electronics, Kyoto, septembre 1970); des phénomènes analogues pourraient intervenir dans les lampes à krypton (Hall).

Aucune *variation de la longueur d'onde* émise en fonction de la pureté de l'isotope utilisé n'a été observée pour les lampes remplies avec du krypton 86 à plus de 99 % (Baird, Engelhard).

L'étude des variations de la longueur d'onde émise en fonction de la pression et de la densité de courant a été reprise et étendue. Selon cette étude, il semble que la longueur d'onde extrapolée pour l'atome non perturbé diffère d'environ 1×10^{-8} de la longueur d'onde obtenue dans les conditions recommandées (Engelhard; Annexe M 2, *fig. 1 a* et *b*). Aux basses pressions les chocs des atomes sur les parois deviennent prépondérants; les valeurs obtenues pour la longueur d'onde dans de telles conditions ne doivent être utilisées qu'avec prudence pour l'extrapolation à pression nulle (Baird).

La longueur d'onde de la radiation émise en différentes régions du capillaire a également été étudiée (P.T.B.); des différences de 5×10^{-9} ont été observées. Un nouveau type de lampe à capillaire plus gros et plus court est présenté (Engelhard); le gradient de pression y est plus faible, le choix d'une région déterminée de la décharge est facilité.

En conclusion, toutes les études évoquées confirment qu'une lampe à krypton 86, utilisée dans les conditions recommandées, reproduit l'unité

de longueur avec une exactitude de 1×10^{-8} . Des complications apparaissent lorsqu'on veut atteindre 1×10^{-9} ; les études correspondantes étant longues et difficiles, il serait souhaitable de fixer un ordre de priorité.

Le Comité Consultatif adopte en conséquence la *Recommandation* M 1 (1970), p. M 20.

2. Rapports des instituts métrologiques nationaux sur la mise en application de la définition du mètre adoptée en 1960

La plupart des laboratoires nationaux utilisaient déjà les mesures interférentielles avant 1960. Le changement de la définition du mètre n'a donc posé aucun problème essentiellement nouveau.

Les mesures directes d'étalons à traits ou à bouts plans, jusqu'à 500 mm ou même 1 m de longueur, à l'aide des interférences de la radiation étalon sont couramment pratiquées.

On utilise en outre (*voir* aussi points 3, 4, 5, 6) :

— la multiplication optique, pour les grandes longueurs;

— les radiations étalons secondaires du krypton 86, du cadmium 114 et du mercure 198, pour appliquer la méthode des coïncidences, ou pour les mesures d'une précision inférieure à 1×10^{-7} ; en raison de la largeur spectrale de ces radiations, leur emploi est toutefois limité aux mesures des longueurs inférieures à 500 mm environ;

— enfin et surtout les lasers à gaz, stabilisés ou non suivant la précision recherchée, pour les mesures où la rapidité est essentielle (étalonnage de règles divisées par comptage de franges) et pour les grandes longueurs.

Les longueurs d'onde des radiations laser sont mesurées par comparaison à la radiation étalon.

Il est nécessaire de déterminer sur place au cours des mesures l'indice de réfraction de l'air qui peut, en atmosphère confinée, être supérieur de quelques 10^{-8} à l'indice de réfraction calculé (Engelhard, Terrien).

3. Travaux sur les radiations étalons secondaires de longueur d'onde recommandées par le C.I.P.M. en 1963; travaux sur d'autres radiations analogues susceptibles d'être recommandées par le C.I.P.M.

Le défaut de symétrie du profil spectral de plusieurs radiations étalons secondaires du mercure 198 (N.P.L.) et du krypton 86 (N.P.L., B.I.P.M.) a été étudié; les résultats sont concordants. La dissymétrie semble liée à l'effet de déplacement par la pression (Engelhard).

Les longueurs d'onde de quelques radiations étalons secondaires du krypton 86 pourraient être légèrement corrigées, par exemple de -3×10^{-8} pour $\lambda = 645$ nm (Terrien); les lampes à krypton 86 excitées

en haute fréquence ont été étudiées par divers laboratoires (N.P.L., N.R.C., N.S.L., P.T.B.).

Plusieurs radiations du krypton 86 et une du mercure 198 ont été suggérées comme nouveaux étalons secondaires (N.R.L.M., B.I.P.M.). Le Comité Consultatif n'estime toutefois pas nécessaire de faire une proposition formelle dans ce sens et il adopte la conclusion suivante :

« Le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre a pris connaissance des travaux effectués sur les étalons secondaires de longueur d'onde.

Il reconnaît l'utilité des études poursuivies, notamment au N.R.L.M. sur la radiation $2p_{10}-5d_8$ du krypton 86 et au B.I.P.M. sur neuf radiations infrarouges du krypton 86. »

4. Lasers utilisés en métrologie

(à l'exclusion des lasers asservis par absorption saturée, voir point 5)

Il s'agit principalement de lasers à gaz hélium-néon ($\lambda = 633$ nm).

La longueur d'onde émise peut être rendue très stable en soignant particulièrement la stabilité mécanique et thermique de la cavité (N.R.C., N.S.L.); on utilise plus couramment l'asservissement soit sur le maximum d'émission, soit sur le « Lamb-dip ». Ces lasers rendent de grands services, mais leur longueur d'onde peut varier en fonction des pressions partielles des gaz de remplissage ou par vieillissement (P.T.B., N.B.S., N.P.L., B.I.P.M.; Annexe M 13); elle doit être étalonnée de temps en temps si l'on veut dépasser la précision de 1×10^{-7} . A cet égard, les lasers asservis sur une cavité ou sur une absorption auxiliaires (N.R.L.M.; Annexes M 4 et M 5) présentent plus de garanties; avec un laser He-Ne ($\lambda = 3,39 \mu\text{m}$) asservi sur une raie d'absorption du méthane, dans une cuve extérieure au laser, on a observé une stabilité de 8×10^{-11} sur une heure (Annexe M 5). On doit également veiller à la pureté spectrale de la radiation émise et à l'absence de couplage optique parasite ou de causes diverses d'entraînement de fréquence qui peuvent produire des défauts de stabilité à court terme (N.P.L.; Annexe M 12).

Le laser à xénon 136 ionisé, qui émet simultanément trois radiations visibles ($\lambda = 627, 542$ et 460 nm), se prête bien à l'utilisation de la méthode des coïncidences (P.T.B.); on espère stabiliser ce type de laser à mieux que 1×10^{-8} (Engelhard).

Le laser à CO_2 peut aussi émettre plusieurs radiations au voisinage de $\lambda = 10 \mu\text{m}$; son utilisation pour la mesure des grandes longueurs est en cours d'étude (Baird).

On peut également appliquer la méthode des coïncidences à partir d'un laser monomode: par modulation en amplitude, on fait apparaître des bandes latérales avec un écart de fréquence bien connu (Kessler; Annexe M 9).

En conclusion,

« Le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre a noté que les études de divers laboratoires, en particulier du N.B.S., du N.P.L. et de la P.T.B., portant sur des lasers He-Ne ($\lambda = 6\,328 \times 10^{-10}$ m), ont fait apparaître des divergences pouvant atteindre $10^{-7} \lambda$ entre divers lasers commerciaux ainsi que des variations du même ordre pour un même laser.

Il attire l'attention des laboratoires qui utilisent de tels appareils comme étalons secondaires de longueur sur la nécessité de les étalonner et de suivre leur évolution. »

5. Radiations de très faible largeur spectrale obtenues par absorption saturée; facteurs qui conditionnent la stabilité de leur longueur d'onde

L'absorption saturée du méthane permet d'asservir la longueur d'onde d'un laser à gaz He-Ne émettant dans l'infrarouge ($\lambda = 3,39 \mu\text{m}$) avec une incertitude qui ne doit pas dépasser 1×10^{-11} . La stabilité dépasse largement la reproductibilité; elle est meilleure que 1×10^{-13} sur des durées comprises entre quelques secondes et quelques milliers de secondes. Ces résultats sont déduits de l'observation des battements entre plusieurs lasers asservis (N.B.S.; Annexe M 14).

La largeur de la raie d'absorption, de l'ordre de 1×10^{-9} , est essentiellement limitée par la longueur d'interaction du rayonnement avec les molécules; le déplacement par effet de pression est inférieur à 10 kHz entre $2,5 \times 10^{-3}$ et $6,5 \text{ N/m}^2$ (0,02 et $50 \mu\text{mHg}$) (N.B.S.) et l'effet Stark est négligeable (Annexe M 3, références 1 et 2).

L'asservissement exact du laser sur la raie d'absorption exige une excellente élimination du couplage avec l'optique; un bon moyen d'y parvenir consiste à utiliser deux lasers: le premier, asservi sur la raie d'absorption saturée, sert de « pilote »; le second, asservi sur le premier laser avec un décalage de fréquence connu, peut être utilisé comme laser de travail (Hall; Annexe M 11).

L'asservissement d'un laser He-Ne ($\lambda = 633 \text{ nm}$) sur une raie d'absorption saturée de l'iode fait l'objet d'études analogues; d'autres raies d'absorption saturée permettraient vraisemblablement d'asservir le laser à CO_2 ($\lambda \approx 10 \mu\text{m}$).

Ces dispositifs sont en cours d'étude dans plusieurs laboratoires (N.B.S., N.P.L., N.R.C.); il serait prématuré de discuter de leurs mérites respectifs. L'iode permet d'utiliser une radiation visible, ce qui est plus commode, mais le rapport signal/bruit est meilleur avec le méthane (Simpson).

Jusqu'ici, les mesures sur ce type de lasers asservis ont principalement porté sur des lasers de construction similaire, comparés entre eux par battements dans le laboratoire qui les avait construits. D'autres mesures sont nécessaires: mesures de longueurs d'onde rapportées à l'étalon de

longueur, comparaisons de longueurs d'onde entre lasers différents, comparaison des résultats obtenus dans divers laboratoires. La cohérence des résultats peut seule donner une évaluation des mérites des procédés d'asservissement et des méthodes de mesure employés (Kessler, Baird). A titre d'exemple, la longueur d'onde d'un même laser asservi sur une raie d'absorption saturée du méthane ($\lambda = 3,39 \mu\text{m}$) a été mesurée au J.I.L.A. et au B.I.P.M.; les résultats (provisoires) diffèrent entre eux de 1×10^{-7} environ. La dispersion des résultats de chaque laboratoire n'excédant pas quelques 10^{-9} , cette différence de 1×10^{-7} ne peut être due qu'à une erreur systématique dont l'origine doit être recherchée (Giacomo, Hamon) ⁽²⁾.

Le but à atteindre étant la métrologie des longueurs, il faut aussi vérifier que les problèmes propres à l'utilisation de ce nouveau type de sources ne rendent pas illusoire le gain de précision qu'on pourrait en attendre (Engelhard). Ce gain de précision correspond dès maintenant à un besoin réel puisque la précision des mesures de g au Bureau International est actuellement limitée à 2 ou 3×10^{-9} par les mesures de longueur (Terrien).

Il y a là un champ d'investigation très prometteur pour l'avenir des mesures de longueur; il convient donc de l'explorer à fond et de développer les échanges et les comparaisons entre laboratoires.

Le Comité Consultatif approuve finalement la conclusion suivante :

« Le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre ayant examiné les progrès des lasers pour la métrologie, souhaite que les laboratoires étudient les applications de ces lasers pour la mesure des longueurs en tenant compte d'une part des possibilités nouvelles offertes par ces appareils, et d'autre part des précautions qui s'imposent lorsqu'ils sont utilisés avec des techniques mises au point pour d'autres types de sources lumineuses ».

Cette conclusion est en outre complétée par l'adoption de la *Recommandation* M 2 (1970), p. M 21.

6. Méthodes et appareils

6 a) Étude des qualités métrologiques des étalons de longueur d'onde

La méthode des battements permet des comparaisons extrêmement précises de fréquence (donc de longueur d'onde) entre lasers; toutefois, si les lasers n'ont pas des fréquences très voisines, il devient nécessaire de comparer la fréquence de battement avec la fréquence d'une autre source cohérente (klystron, laser, etc.) dans un montage hétérodyne, pour ramener la fréquence à analyser dans le domaine des radiofréquences.

⁽²⁾ De nouvelles mesures au J.I.L.A. ont permis d'attribuer l'origine de cette différence à l'évaluation de certains termes correctifs; les résultats concordent maintenant à 1×10^{-9} (Lettre de R. L. Barger (J.I.L.A.) du 10 mars 1971).

Pour les comparaisons de longueurs d'onde et l'étude des profils spectraux, plusieurs types d'interféromètres sont couramment utilisés :

- Perot-Fabry à miroirs plans (N.P.L., N.R.C., N.S.L., P.T.B.);
- Perot-Fabry à miroirs sphériques (N.S.L.);
- Perot-Fabry à miroir plan et miroir sphérique (Annexe M 11);
- Michelson à miroirs plans (N.R.C., B.I.P.M.);
- interféromètre à prisme de Kösters (P.T.B.);
- interféromètre à « ruban de Möbius » (N.R.L.M.).

6 b) *Mesure des étalons à bouts, des étalons à traits et des déplacements*

Pour la mesure des *étalons à bouts plans*, la méthode interférentielle statique (mesure de la partie fractionnaire des ordres d'interférence avec plusieurs radiations et recherche des coïncidences) reste la plus utilisée, avec des interféromètres de types divers: Fizeau (N.P.L., N.R.C., B.I.P.M.), Michelson (N.R.C., N.R.L.M., B.I.P.M.), Kösters (N.P.L., N.S.L., P.T.B.).

La radiation étalon du krypton 86 et les radiations étalons secondaires permettent des mesures directes de calibres jusqu'à 250 mm ou 500 mm. Pour les longueurs supérieures, les mesures s'effectuent le plus souvent de proche en proche : soit par multiplication optique, soit par mesure de différences entre calibres.

Les mesures directes de calibres jusqu'à 1 m sont possibles avec la radiation étalon en déterminant la partie entière des ordres d'interférence par comptage de franges (*voir ci-dessous*).

Pour les *étalons à traits*, les mesures s'effectuent par déplacement de l'étalon sous un microscope, généralement photoélectrique, qui pointe les traits successivement. L'étalon est solidaire de l'un des miroirs d'un interféromètre de Michelson; la distance entre deux traits est déduite de la variation de l'ordre d'interférence que l'on peut elle-même déduire de mesures interférentielles statiques, comme pour les étalons à bouts plans.

Pour la mesure du déplacement de l'étalon on utilise maintenant de plus en plus le comptage des franges d'interférence d'une radiation laser (N.B.S., N.P.L., N.R.C., N.R.L.M., P.T.B., B.I.P.M.), parfois avec enregistrement automatique des résultats (N.P.L., N.R.L.M., P.T.B.). La même méthode est appliquée à la mesure des calibres en remplaçant le microscope photoélectrique par un palpeur électro-mécanique (N.P.L.) ou par l'observation du contact optique (B.I.P.M.).

L'indice de réfraction de l'air est le plus souvent déterminé sur place au cours des mesures (N.S.L., N.P.L., N.R.C., P.T.B., N.R.L.M., B.I.P.M.).

La *précision et l'exactitude* des mesures sont limitées par les qualités des appareils utilisés et les caractéristiques des étalons à mesurer (Annexe M 7).

La reproductibilité des pointés des traits dépend essentiellement de la qualité et de la conservation du tracé (Bruce, Terrien). On peut espérer une amélioration sur ce point avec les nouveaux procédés de fabrication

des étalons à traits, par exemple par dépôt de couches métalliques réfléchissantes sur verre (Bruce, Kessler, Simpson), ou en utilisant des lignes de foi virtuelles (Carré). Une normalisation pourrait être envisagée (Otero, Simpson).

La limite actuelle de la précision du pointé des traits à l'aide de microscopes photoélectriques est de l'ordre de 10 nm; elle peut être améliorée avec les meilleurs tracés (Carré).

On a vérifié que le retournement des règles élimine bien les erreurs liées aux conditions d'éclairage des traits (Baird) et que l'effet des déformations du comparateur dues aux déplacements du chariot porte-règle est négligeable, tout au moins sur les comparateurs du N.R.C. (Baird) et du B.I.P.M. (Carré).

La *stabilité* des étalons en matériaux nouveaux à faible coefficient de dilatation (« Cer-Vit », « ULE Quartz », « Zerodur »), est étudiée dans plusieurs laboratoires (Annexe M 15); elle est meilleure que 1×10^{-6} par an, mais la durée d'expérimentation (deux ans) est encore insuffisante pour en tirer une conclusion (Bruce, Hall, Simpson). Un étalon en silice fondue de 80 cm de longueur, utilisé à poste fixe au B.I.P.M. pour la mesure de g , maintenu sous vide et à température constante, n'a pas évolué de plus de 1×10^{-9} en trois ans (Sakuma).

Ce dernier exemple illustre bien l'intérêt qu'il y aurait à atteindre une exactitude supérieure à 1×10^{-9} (Terrien). C'est toutefois un cas très particulier. La longueur d'étalons matériels n'est qu'exceptionnellement définie et mesurable avec une incertitude inférieure à 10 nm (Engelhard, Sakurai, Carré). Certains utilisateurs demandent mieux (Simpson) mais cela semble peu réaliste (Engelhard, Rowley).

L'*étude statistique* des résultats d'expériences nombreuses, effectuées autant que possible dans plusieurs laboratoires, est essentielle pour évaluer l'exactitude des mesures. Les calculs nécessaires peuvent aisément être effectués à l'aide d'ordinateurs. Il est donc très important d'organiser les mesures en fonction de cette exploitation statistique, et en particulier d'augmenter le nombre des mesures en les rendant automatiques (Simpson).

7. Mesures comparatives internationales de longueur

Bien que les mesures interférentielles directes, en particulier celles qui utilisent les lasers, soient préférables pour le travail de laboratoire, surtout pour les grandes longueurs, les étalons matériels à traits et à bouts conservent une grande importance pratique (Baird, Simpson).

Des comparaisons internationales organisées par le B.I.P.M. permettraient d'étudier les qualités des étalons eux-mêmes, de comparer les mérites des méthodes et des appareils de mesure et de déceler les erreurs systématiques (Otero, Baird, Kessler, Simpson; Annexe M 7).

Ces comparaisons doivent porter sur des étalons de type courant

permettant d'éprouver les méthodes de mesure usuelles (Baird, Rowley); on devra choisir des étalons de la meilleure qualité (Baird) ou représentatifs de cas typiques (Kessler).

Les mesures comparatives peuvent porter sur des étalons à bouts plans (Engelhard), mais ils se prêtent difficilement à l'automatisation des mesures (Simpson); par ailleurs, les défauts de planéité et de parallélisme des faces, la nécessité de les mettre en adhérence sur un plan et de tenir compte des pertes de phase à la réflexion posent quelques problèmes. Le cas des étalons à traits soulève moins d'objections. Avec la qualité actuelle des tracés, l'influence des conditions d'observation des traits devrait être faible et les comparaisons permettraient justement de l'étudier (Kessler). Certains tracés sur support transparent sont excellents, mais les meilleures règles de ce type ont une section rectangulaire de dimensions inusitées (Simpson); il n'est pas sûr que les comparateurs de certains laboratoires intéressés puissent être adaptés à la mesure de ces règles.

La circulation d'un jeu de calibres à bouts plans (jusqu'à 10 cm) fourni par le N.B.S. est proposée (Simpson); des longueurs plus grandes paraissent préférables (Baird, Engelhard). La circulation de micromètres-objets de 1 mm (N.P.L.), de règles et calibres de 1 m (N.P.L., N.R.L.M., B.I.P.M.) et de rubans géodésiques jusqu'à 50 m (N.P.L.) a été suggérée.

Le N.B.S. propose par ailleurs de fournir des schémas d'organisation des mesures et d'analyse des résultats (Simpson).

Quelques réserves sont faites sur l'utilité de telles comparaisons compte tenu du travail considérable qu'elles demandent et des risques auxquels sont exposés les étalons au cours des transports répétés (Engelhard).

Tous les laboratoires représentés à cette session désirent néanmoins participer aux comparaisons envisagées.

En conclusion, le Comité Consultatif adopte la *Recommandation* M 3 (1970), p. 21.

8. Échanges de vues sur l'éventualité d'un changement de la définition de l'unité de longueur, faisant intervenir par exemple les lasers ou la vitesse de la lumière

Les réponses au questionnaire (Annexes M 2, M 3, M 6), dont les grandes lignes sont résumées ci-dessous, montrent une grande concordance de vues sur ce point.

Une radiation émise par un laser asservi sur une raie d'absorption saturée sera tôt ou tard utilisée comme étalon de longueur. Le choix d'une telle radiation pour établir une nouvelle définition du mètre serait toutefois prématuré: il devrait conduire à la meilleure exactitude des mesures de longueur et, dans ce domaine précis, les résultats expérimentaux sont encore trop peu nombreux pour guider un choix et justifier un changement de définition de l'unité de longueur.

La même remarque s'applique à une éventuelle utilisation de la vitesse de la lumière pour définir l'unité de longueur. Les expériences en cours ou en projet (Annexes M 8, M 9, M 10) constituent un excellent banc d'essai pour les lasers asservis, considérés comme étalons de longueur ou de fréquence. Aucune de ces expériences ne permet encore d'affirmer que, dans un avenir proche, on pourra déduire les mesures de longueur les plus précises de mesures de temps (ou de fréquence) et de la valeur attribuée à la vitesse de la lumière.

En conclusion, le Comité Consultatif adopte la *Recommandation M 4* (1970), p. 21.

9. Questions diverses

Des modèles de lampes à krypton 86, à cadmium 114 et à mercure 198 ont été présentés au cours de la réunion (Engelhard); ces modèles devraient être commercialisés. Dans le cas contraire, la P.T.B. envisage dans un proche avenir d'en fournir aux laboratoires qui en désireraient.

*
* *

L'ordre du jour étant épuisé, le Président clôt la session en remerciant tous les participants de leur concours.

(Mars 1971)

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

Poursuite des études sur la radiation étalon primaire et sur les lasers stabilisés

RECOMMANDATION M 1 (1970)

Le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre,

CONSIDÉRANT que les prescriptions énoncées dans la *Recommandation du Comité International des Poids et Mesures (1960)* pour la mise en pratique de la définition du mètre assurent bien l'exactitude de 10^{-8} ,

que l'amélioration de cette exactitude exigera encore un travail considérable, notamment pour étudier la dissymétrie du profil spectral de cette radia-

(*) Ces quatre Recommandations ont été approuvées par le Comité International à sa 59^e session (octobre 1970).

tion et pour déterminer les corrections par rapport à la radiation qui serait émise par des atomes non perturbés,

RECOMMANDE *que les laboratoires qui en ont la possibilité poursuivent ou entreprennent de telles études.*

RECOMMANDATION M 2 (1970)

Le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre,

RECOMMANDE *vivement aux laboratoires d'entreprendre ou de poursuivre l'étude des lasers stabilisés et d'étudier leurs qualités en tant qu'étalons pour la mesure des longueurs,*

RECOMMANDE *de mesurer la longueur d'onde des radiations ainsi produites par comparaison à l'étalon primaire,*

CONSIDÉRANT *que les comparaisons de longueurs d'onde peuvent être plus précises lorsque l'on compare deux lasers,*

RECOMMANDE *pour le moment l'emploi des deux dispositifs les mieux étudiés jusqu'à présent, c'est-à-dire ceux qui utilisent l'absorption saturée par le méthane ou par l'iode,*

RECOMMANDE *que le Bureau International des Poids et Mesures veille à maintenir les relations mutuelles entre les membres du Comité Consultatif pour la Définition du Mètre et qu'une fois atteinte la concordance entre les résultats de divers laboratoires, des valeurs des longueurs d'onde de ces lasers soient adoptées à titre provisoire.*

Comparaisons internationales d'étalons matériels de longueur

RECOMMANDATION M 3 (1970)

Le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre,

CONSIDÉRANT *qu'il est nécessaire d'éprouver les appareils et les méthodes tels qu'ils sont employés dans les divers laboratoires pour les étalonnages courants, en vue d'évaluer avec certitude l'exactitude atteinte,*

RECOMMANDE *que soient organisées des comparaisons internationales d'étalons matériels de longueur.*

Mesure des fréquences optiques, de la vitesse de la lumière, et définition du mètre

RECOMMANDATION M 4 (1970)

Le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre,

CONSIDÉRANT *le développement rapide des lasers stabilisés et la possibilité de mesure directe de fréquences optiques, ce qui pourra conduire de deux façons*

*différentes à une définition du mètre meilleure que la définition actuelle,
DÉCLARE toutefois que le moment n'est pas encore venu de définir les étapes
de ce changement de définition,*

*RECOMMANDE, en raison de l'utilisation possible de la vitesse de la lumière
pour une future définition du mètre, que les laboratoires envisagent d'effectuer
non seulement des recherches sur la stabilisation des lasers mais aussi des
mesures de la vitesse de la lumière,*

*NOTE que ces recherches intéressent aussi le Comité Consultatif pour la
Définition de la Seconde.*

ANNEXE M 1

Documents présentés à la 4^e session du C.C.D.M.

Document

N°

- 70-4 Consultation préalable par correspondance.
Ce document, préparé par le B.I.P.M. et adressé aux membres du C.C.D.M. le 16 février 1970, contient un certain nombre de questions auxquelles les membres étaient priés de répondre avant la session. Ces questions, ainsi que les réponses reçues, sont données à l'Annexe M 2.
- 70-5 N.S.L. (Australie).- Reply to questions of Document No. 70-4.
- 70-6 The perspective of a novel definition of meter (Comments on item 8 of Document No. 70-4), by K. Shimoda (Voir Annexe M 3).
A ce document étaient joints les tirages à part des deux articles suivants :
Stark effect of the absorption line of methane observed by the 3.391 μm He-Ne maser, by K. Uehara, K. Sakurai and K. Shimoda (J. Phys. Soc. Japan, 26, No. 4, 1969, pp. 1018-1022).
Absolute frequency stabilization of the 3.39 μm laser on a CH_4 line, by K. Shimoda (IEEE Trans. Instrum. and Measurement, IM-17, No. 4, Dec. 1968, pp. 343-346).

Document

N°

- 70-7 N.R.L.M. (Japon).- Answers to Document No. 70-4.
- 70-8 N.P.L. (Royaume-Uni).- Reply to questions of Document No. 70-4.
- 70-9 N.R.C. (Canada).- Reply to questions of Document No. 70-4.
- 70-10 N.B.S. (États-Unis d'Amérique).- Comments by NBS staff members for the C.C.D.M., September 1970 (Voir Annexe M 6).

A ce document étaient joints en annexes les Notes et tirages à part suivants :

International intercomparison of Lamb-dip stabilized He-Ne lasers, by K.D. Mielenz (Voir Annexe M 13).

Reproducibility of helium-neon laser wavelengths at 633 nm, by K.D. Mielenz *et al.* (Appl. Optics, 7, No. 2, 1968, pp. 289-293).

Research at NBS, Boulder Laboratories utilizing the methane stabilized laser, by J.L. Hall and R.L. Barger (voir Annexe M 14).

Pressure shift and broadening of methane line at 3.39 μ studied by laser-saturated molecular absorption, by R.L. Barger and J.L. Hall (Phys. Rev. Letters, 22, No. 1, 1969, pp. 4-8).

Use of laser-saturated absorption of methane for laser frequency stabilization, by R.L. Barger and J.L. Hall (Proc. 23rd Ann. Symposium on Frequency Control, Fort Monmouth, N.J., 6-8 May 1969, p. 306).

Precision wavelength measurement of the methane 3.39 μ saturated absorption line by laser-controlled interferometry, by R.L. Barger and J.L. Hall (Presented to the VIth Internat. Conf. on Quantum Electronics, Kyoto, Sept. 1970).

On the use of a wavelength standard to measure a material object, by J.A. Simpson (Voir Annexe M 7).

Progress towards measuring the frequency of visible light, by K.M. Evenson, J.S. Wells and L.M. Matarrese (Voir Annexe M 8).

Document

N°

Progress in measuring optical frequencies and the speed of light by means of the technique of microwave modulation of laser light, by Z. Bay and G. Luther (Voir Annexe M 9).

Progress report on a measurement of the velocity of light using long path interferometry, by J. Levine (Voir Annexe M 10).

Wavelengths synthesis techniques for the comparison of primary and secondary standards, by R.D. Deslattes, K.D. Mielenz, W.G. Schweitzer and H.P. Layer (Voir Annexe M 11).

- 70-11 B.I.P.M.- Réponse au questionnaire du Document N° 70-4.
- 70-12 P.T.B. (Allemagne).- Reply to questionnaire of Document No. 70-4.
- 70-13 Recherches sur des Mètres à bouts, par Y. Väisälä, (Voir Annexe M 15).
- 70-15 N.R.L.M. (Japon).- A method for stabilizing the frequency of an unmodulated He-Ne laser, by K. Tanaka and T. Sakurai (Voir Annexe M 4).
- 70-17 N.R.L.M. (Japon).- Frequency stabilization of the 3.39 μm laser on a CH_4 line, by T. Tako, M. Ohi, Y. Akimoto, A. Sugiyama and K. Shimoda (Voir Annexe M 5).
- 70-18 N.R.L.M. (Japon).- A gauge interferometer for the routine measurement of block gauges up to 250 mm, by Y. Sakurai and S. Seino (Publié dans Annals of the C.I.R.P., Vol. XIII, 1965, pp. 411-415, et Bull. Nat. Res. Lab. Metrology, No. 14, 1967, pp. 34-38).
- 70-16, 19,20 N.R.L.M. (Japon).- Figures reproduites dans l'Annexe M 2 (Fig. 2, 6, 7, 8).

ANNEXE M 2

Consultation préalable par correspondance

Cette consultation préalable a été préparée par le Bureau International des Poids et Mesures afin de rendre plus efficaces les discussions au cours de la 4^e session du C.C.D.M. en vue des décisions à prendre. Le questionnaire, adressé aux membres du C.C.D.M. le 16 février 1970, concernait les sujets suivants :

- Radiation étalon primaire et radiations étalons secondaires recommandées : caractéristiques et conditions de fonctionnement des lampes en usage ; déplacement de la longueur d'onde et profil spectral ; corrections (Questions 1a, 1b, 2a).
- Études sur d'autres radiations secondaires possibles (laser exclu) (Question 2b).
- Lasers à gaz asservis en métrologie des longueurs (Questions 3, 4).
- Changements et nouveautés, dans la technique des mesures précises de longueur, entraînés par la définition du mètre de 1960 (Question 5).
- Méthodes et appareils pour l'étude des étalons de longueurs d'onde, et pour la mesure d'étalons à bouts, à traits et de la longueur de déplacements. Organisation de mesures comparatives internationales (Questions 6, 7).

- Perspectives d'un éventuel changement de la définition du mètre (Question 8).

Les réponses reçues, classées par question, sont données ci-après ; certaines réponses font en outre l'objet de développements donnés dans les Annexes.

QUESTION 1a

Quelles sont les caractéristiques et les conditions de fonctionnement des lampes en usage dans votre laboratoire pour produire la radiation $2p_{10} - 5d_5$ du krypton 86 ?

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES (N.R.C.), Ottawa

Les lampes à krypton 86 que nous utilisons sont fabriquées (ainsi que l'isotope) au N.R.C. ; elles sont conformes aux spécifications internationales de 1960.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (N.P.L.), Teddington

Les lampes à krypton 86 utilisées au N.P.L. pour produire la radiation étalon sont du type Engelhard et ont été fabriquées à la P.T.B. Elles ont un capillaire de 2 mm de diamètre nominal et sont utilisées avec un courant de décharge d'environ 10 mA. Le capillaire est vu par l'observateur du côté anode, à travers les parois du vase de Dewar contenant l'azote liquide maintenu à une température un peu inférieure à 63,5 K. On admet que la valeur de la longueur d'onde dans le vide est la valeur nominale définie pour l'atome non perturbé, sans aucune correction pour la pression ou pour d'autres effets.

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY (N.R.L.M.), Tokyo

Nous utilisons des lampes à krypton 86 à cathode chaude du type Engelhard. Le tube est construit dans notre laboratoire et le krypton est acheté au Oak Ridge Laboratory (U.S.A.).

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (P.T.B.), Braunschweig

La P.T.B. utilise des lampes à krypton 86 conformes aux recommandations du C.I.P.M., avec un capillaire de 80 mm de longueur et de 2 mm de diamètre. Depuis peu, la pureté du krypton 86 a été portée à 99,9 % ou mieux pour éliminer une cause possible de dissymétrie de la raie.

On a conçu une lampe sans électrodes pour les applications spectroscopiques. Le rayonnement est produit par excitation en haute fréquence dans un tube d'environ 140 mm de longueur et 4 mm de diamètre, vu en bout ou latéralement. Cette lampe est généralement utilisée à la température ambiante. La pression peut être ajustée en immergeant un appendice latéral de la lampe dans un bain réfrigérant. Une lampe de ce type a été utilisée, par exemple par G. Norlén (Metrologia, 6, 1970, p. 19).

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES (B.I.P.M.), Sèvres

Le B.I.P.M. utilise des lampes du type Engelhard provenant de la P.T.B. Elles fonctionnent normalement au point triple de l'azote (63 K) ; pour des différences de marche supérieures à 0,5 m, elles fonctionnent à 58 K dans un bain d'azote et d'oxygène. La longueur d'onde est alors celle qui résulte de l'étude publiée dans Comité Consultatif pour la Définition du Mètre, 3^e session, 1962, pp. 76-82.

QUESTION 16

Résultats obtenus depuis 1962 concernant les déplacements de la longueur d'onde et le profil spectral de la radiation étalon primaire, et sur les corrections par rapport à la radiation qui serait émise par des atomes non perturbés.

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES (N.R.C.), Ottawa

On a seulement fait des mesures préliminaires sur le profil spectral de la raie $2p_{10} - 5d_5$ du krypton 86 ; elles confirment la très petite dissymétrie trouvée au N.S.L. et au B.I.P.M.

Des mesures effectuées sur la radiation $2p_{10} - 5d_5$ d'une lampe sans électrodes, sous faible pression, à température ambiante, ont montré l'effet attendu d'élargissement par effet Doppler et un déplacement vers le rouge de 3×10^{-5} nm.

La lampe à krypton 86 excitée en haute fréquence, fournie par Engelhard à Humphreys, utilisée à 63 K, a montré un déplacement vers le rouge de 1×10^{-5} nm et un élargissement d'environ 7 %.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (N.P.L.), Teddington

Quelques mesures du profil spectral de la radiation émise par une lampe Engelhard ont été effectuées de façon à confirmer, par une autre méthode, l'existence de la légère dissymétrie qui a déjà été signalée.

La méthode est fondée sur l'emploi d'un interféromètre de Perot-Fabry. Comme il est bien connu, la difficulté avec cet appareil pour une telle étude provient de la distorsion des franges due aux imperfections de l'interféromètre. La figure d'interférence observée est une convolution du véritable profil spectral avec une fonction propre à l'instrument employé. Dans ces expériences, la répartition de l'intensité dans les figures d'interférence est déterminée par balayage de pression en utilisant une

détection photoélectrique et en enregistrant les intensités par échantillonnage régulier sur bande de papier sous forme numérique. La figure obtenue peut ensuite être analysée par la méthode de Fourier à l'aide d'un ordinateur. On utilise comme source de référence un laser hélium-néon asservi ayant une largeur spectrale exceptionnellement étroite, de sorte que son profil enregistré est dû presque entièrement à la fonction instrumentale. Une analyse théorique simple de l'influence des diverses contributions à la fonction instrumentale (défauts de planéité et de parallélisme, facteur de réflexion, géométrie du diaphragme explorateur) a montré comment une déconvolution satisfaisante pouvait être effectuée en utilisant ces coefficients de Fourier.

Le résultat obtenu pour le profil spectral de la radiation étalon de krypton 86 est en bon accord avec les déterminations antérieures, la largeur étant d'environ $1,3 \text{ m}^{-1}$. Une légère dissymétrie est décelée, caractérisée par la pente de la ligne médiane. La valeur de cette dissymétrie est comparable à celle qui a été obtenue au B.I.P.M. en 1962 à l'aide d'un interféromètre de Michelson (Rev. Optique, 42, 1963, pp. 519-531). Les observations faites à cette époque avaient donné une pente de la ligne médiane d'environ $0,02 \text{ m}^{-1}$, tandis que la nouvelle détermination donne une valeur de $0,018 \text{ m}^{-1}$.

Depuis 1962 aucune autre mesure n'a été faite concernant les variations de longueur d'onde de la source étalon sous différentes conditions d'utilisation, ou l'extrapolation de la longueur d'onde aux conditions non perturbées.

NATIONAL STANDARDS LABORATORY (N.S.L.), Chippendale

La dissymétrie de la radiation $605,8 \text{ nm}$ du krypton 86 a été étudiée au moyen de l'interféromètre Perot-Fabry à balayage avec des techniques améliorées. On a fait un enregistrement point par point de l'intensité avec retour au pic de transmission entre deux points successifs. L'intervalle de temps pour la séquence des lectures : référence — point — référence, était d'environ 20 s ; l'interféromètre étant maintenu sous vide et sa température étant stabilisée, les

dérives durant cette période ne dépassaient jamais quelques millièmes de frange. La précision sur les intervalles d'exploration correspondait à 1×10^{-9} du nombre d'ondes, et la précision sur les valeurs de l'intensité était de 2×10^{-9} au voisinage du pic et d'environ 5×10^{-9} dans la région des pieds du profil. Sans faire aucune correction pour une dissymétrie instrumentale possible, le défaut de symétrie (écart de la ligne médiane du profil) pour les ordonnées $1/2$, $1/4$ et $1/10$ de l'intensité maximale est, respectivement, $0,003 \text{ m}^{-1}$, $0,010 \text{ m}^{-1}$ et $0,018 \text{ m}^{-1}$. Des mesures faites avec un laser He-Ne n'ont pas révélé de défaut instrumental, mais l'instabilité du laser limitait la précision à 1×10^{-9} .

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (P.T.B.), Braunschweig

Pour obtenir les corrections qui ramènent la valeur de la longueur d'onde aux conditions de l'atome non perturbé, les variations de la longueur d'onde en fonction de la pression et du courant ont été mesurées de nouveau, avec un interféromètre de Perot-Fabry à balayage. Par rapport aux études précédentes, ce travail a été considérablement étendu en ce qui concerne les domaines de pression et de densité de courant explorés (pressions correspondant à des températures de 59 K à 77 K et densités de courant jusqu'à 3 A/cm^2), ainsi que le nombre et la précision des mesures. Les résultats de ces mesures montrent que la lampe à krypton 86, utilisée dans les conditions recommandées, reproduit la longueur d'onde de la définition du mètre à quelques 10^{-9} près, si l'on admet que la méthode d'extrapolation utilisée jusqu'à maintenant (pression nulle) est correcte. Avec une méthode d'extrapolation plus raffinée, non seulement à pression nulle mais aussi à courant nul, la différence serait de l'ordre de 1×10^{-8} . Une partie de cette différence vient probablement de ce que, dans ces dernières mesures, on a utilisé seulement le rayonnement provenant d'une petite partie de la section droite du capillaire, au voisinage de son axe ; la longueur d'onde semble en effet varier dans une même section droite. On a observé, en particulier, que le

déplacement par effet Doppler décroît en fonction du rayon, entre l'axe et la paroi, d'environ 5×10^{-9} à 63 K et $0,3 \text{ A/cm}^2$ (fig. 1a et 1b).

Pour éviter les difficultés qui pourraient résulter de cet effet et du gradient de pression le long du capillaire, on a conçu une lampe à krypton 86 modifiée, avec un capillaire de 40 mm de long et de 4 mm de diamètre. On se propose de reprendre les mesures avec ce nouveau type de lampe, en utilisant seulement une région de 1 ou 2 mm de diamètre autour de l'axe, pour atteindre une exactitude de 1×10^{-9} . La participation d'autres laboratoires à ce travail serait souhaitable.

QUESTION 2 a

Radiations étalons secondaires de longueur d'onde recommandées par le C.I.P.M. en 1963 : caractéristiques des lampes ; résultats obtenus depuis 1962 concernant les déplacements de la longueur d'onde et le profil spectral.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (N.P.L.), Teddington

Les mesures interférentielles des étalons à bouts sont faites en utilisant la radiation étalon primaire et des radiations étalons secondaires émises par une lampe à krypton 86. La géométrie de la lampe et ses conditions de fonctionnement sont conformes aux recommandations du C.I.P.M.

Les plus petits calibres jusqu'à 100 mm de longueur sont mesurés en fonction des étalons secondaires du mercure 198. Nous utilisons des lampes sans électrodes, refroidies à l'eau, contenant de l'argon à des pressions comprises entre 100 et 400 N/m^2 . L'eau de refroidissement peut avoir une température de $10 \text{ }^\circ\text{C}$, mais pour les mesures qui ne demandent pas la plus grande exactitude on utilise quelquefois des températures de fonctionnement plus hautes, de façon à obtenir une intensité plus grande.

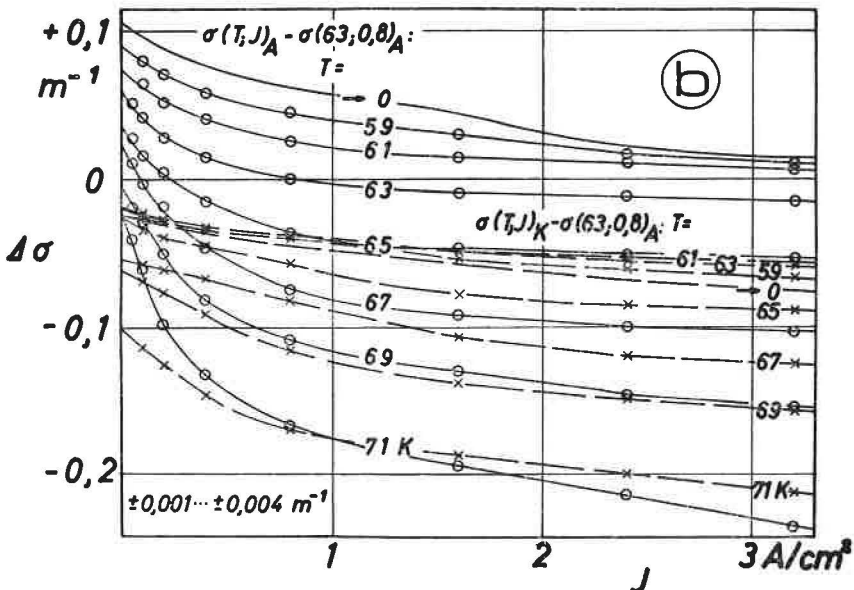
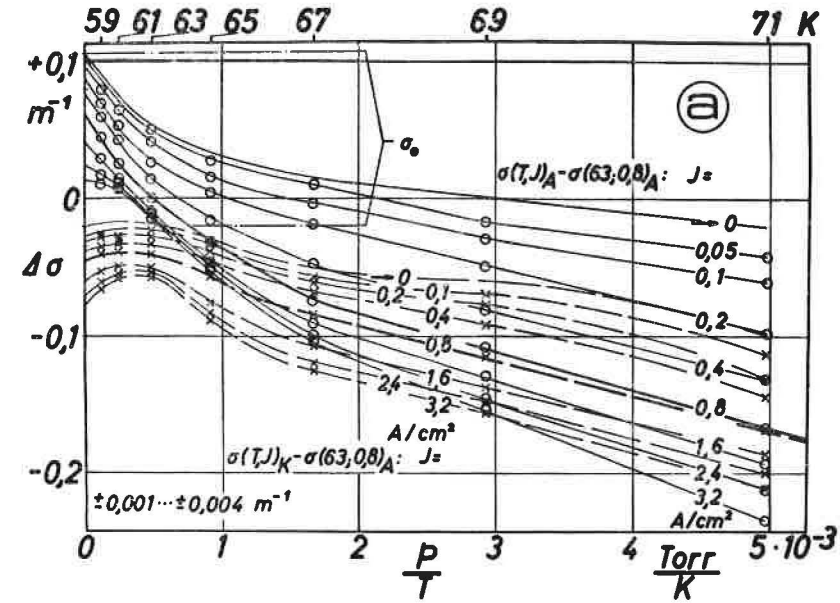


Fig. 1 a et b. - Variation du nombre d'ondes de la radiation étalon primaire en fonction de la pression (fig. 1 a) et de la densité du courant dans le capillaire (fig. 1 b).

Pour les calibres inférieurs à 25 mm et pour lesquels une grande exactitude n'est pas demandée, nous utilisons les raies spectrales d'une lampe à cadmium naturel. Les valeurs des longueurs d'onde de ces raies sont déterminées par comparaison aux étalons du mercure 198 et du krypton 86.

Quelques observations des profils spectraux des étalons secondaires du mercure 198 ont été faites en utilisant la technique déjà décrite pour l'étalon primaire. Le profil de la raie verte $\lambda = 546$ nm montre nettement l'effet dissymétrique de l'auto-absorption lorsque la lampe est utilisée à une température de 21 °C, tandis que cet effet est bien symétrique à des températures plus basses (13 °C et 7 °C). La largeur à mi-hauteur a été trouvée égale à $2,1 \text{ m}^{-1}$ à 7 °C et $2,7 \text{ m}^{-1}$ à 21 °C. Par contre, les deux raies jaunes ne montrent aucun signe d'auto-absorption et leur largeur varie seulement de 10 % ($1,8$ à $2,0 \text{ m}^{-1}$) entre ces températures. Ces résultats sont en accord avec ceux des observations antérieures.

NATIONAL STANDARDS LABORATORY (N.S.L.), Chippendale

On a constaté que dans les lampes sans électrodes excitées à des fréquences de l'ordre de 100 MHz, il se produit de rapides phénomènes de désorption et d'absorption du gaz par les parois. Ces phénomènes produisent des variations de pression de plusieurs centaines de N/m^2 , distinctes de la baisse de pression relativement lente produite par vieillissement. Cependant, les variations n'excèdent pas une centaine de N/m^2 dans le cas des lampes à mercure à décharge si on les utilise refroidies par circulation d'eau à 10 °C et avec une puissance juste suffisante pour fournir une luminosité convenable (habituellement quelques watts de puissance absorbée). Les effets dépendent de la fréquence : à 2 GHz ils sont peu importants, et inexistantes pour les lampes alimentées en courant continu (Vacuum, 16, 1966, p. 433). De ces expériences il ressort que les lampes à électrodes alimentées en courant continu semblent être des sources plus dignes de confiance pour produire les radiations étalons du mercure 198 et du cadmium 114.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (P.T.B.), Braunschweig

La P.T.B. a mis au point une lampe à cadmium 114 et une lampe à mercure 198, du type Osram ; cette dernière lampe possède une chemise pour le refroidissement par circulation d'eau. Les longueurs d'onde et les profils spectraux des radiations émises ont été mesurés et les conditions d'utilisation ont été précisées pour que ces lampes soient conformes, à tous égards, aux recommandations adoptées par le C.C.D.S. en 1962.

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES (B.I.P.M.), Sèvres

Par transformation de Fourier de la visibilité complexe (contraste des franges, et position des franges par rapport à une succession parfaitement régulière) des interférences à deux ondes, on a calculé le profil spectral de quelques radiations visibles du krypton 86 produites par une lampe conforme aux spécifications pratiques de la définition du mètre de 1960. La phase de cette visibilité a été mesurée par comparaison à celle de la radiation $2p_{10} - 5d_5$ antérieurement étudiée par une méthode absolue. Le résultat montre que ces radiations ont toutes un profil spectral légèrement dissymétrique⁽¹⁾.

(1) TERRIEN (J.), Étude de profils de raies avec connaissance de la phase, Journ. Phys., 28, 1967, Suppl. au N°3-4, pp. C2-3 à C2-10.

QUESTION 2 b

Avez-vous étudié d'autres radiations susceptibles d'être recommandées comme étalons secondaires pour les besoins des mesures de longueur (laser exclu) ?

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (N.P.L.), Teddington

Une lampe à krypton 86 excitée en haute fréquence et refroidie à l'air est une source commode de raies spectrales qui peuvent fournir des étalons secondaires de longueurs d'onde convenables. Quelques mesures ont été faites sur la raie 605,8 nm (*Metrologia*, 4, 1968, p. 146), mais sa faible intensité est décourageante et aucun autre travail n'a été fait sur cette source.

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY (N.R.L.M.), Tokyo

A l'occasion d'un récent travail, nous avons trouvé incidemment que la longueur d'onde du krypton 86 adoptée en 1960 comme étalon primaire et les quatre autres longueurs d'onde recommandées en 1962 comme étalons secondaires ne constituent pas un ensemble satisfaisant pour l'application de la méthode des coïncidences.

Supposons qu'une première approximation de la différence de marche ne puisse pas être faite à mieux que 200 μm . Ainsi qu'on peut facilement le voir dans le tableau I, il y a une forte possibilité d'erreur due à une fausse coïncidence située à 117,536 μm de la vraie coïncidence. Pour éviter cette confusion il est nécessaire d'utiliser une autre longueur d'onde du krypton 86 ; nous avons choisi la radiation $2p_{10} - 5d_6$ dont la longueur d'onde est, d'après les tables de Kaufman et Humphreys, 0,608 454 41 μm . On voit à la dernière ligne du tableau I que la fausse coïncidence donne, pour cette radiation, une erreur résiduelle de 0,104 μm , ce qui élimine ainsi la confusion possible.

TABLEAU I

Fausse coïncidence

| Radiation | Nombre d'ondes entier | Différence de marche | Écart par rapport à la moyenne |
|------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|
| $2p_9 - 5d_4$ | 182 | 117,537 μm | + 0,001 μm |
| $2p_8 - 5d_4$ | 183 | 537 | + 1 |
| $2p_{10} - 5d_5$ | 194 | 521 | - 15 |
| $1s_3 - 3p_{10}$ | 208 | 543 | + 7 |
| $1s_4 - 3p_8$ | 261 | 544 | + 8 |
| | Moyenne ... | 536 | |
| $2p_{10} - 5d_6$ | 193 | 432 | - 104 |

Cette radiation ne présente pas non plus d'effet d'auto-absorption et son intensité est seulement légèrement plus faible que celle de la radiation étalon.

Nous considérons donc qu'il est souhaitable d'ajouter une radiation aux cinq radiations recommandées pour le krypton 86 ; la radiation $2p_{10} - 5d_6$ apparaît comme la plus appropriée parmi les autres radiations visibles de cette source.

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES (B.I.P.M.), Sèvres

1. Neuf radiations du krypton 86 dans l'infrarouge proche, de longueurs d'onde comprises entre 0,85 et 1,1 μm , ont été étudiées en détail⁽²⁾. Le tableau II rassemble les résultats obtenus.

Les variations de $\frac{\log V}{D}$ (V = visibilité, D = différence de marche) en fonction de D donnent des informations sur le profil spectral. Les courbes représentatives sont linéaires jusqu'au-delà de $D = 1 \text{ m}$ pour les neuf radiations. Le profil des raies (supposé symétrique) peut donc être correctement représenté par la convolution d'un profil Doppler de largeur à mi-hauteur δ_1 et d'un profil Lorentz de largeur à mi-hauteur δ_2 . Les valeurs de δ_1 et δ_2 sont données dans le tableau II.

⁽²⁾ CZERWONKA (R.), GIACOMO (P.) et HAMON (J.), Metrologia, 6, N° 3, 1970, pp. 74-81.

TABLEAU II

| Transition (Paschen) | Intensité photoélectrique relative | λ_{vide} (nm) | Écart-type d'une mesure (fm) | σ_{vide} (m^{-1}) | Différence de marche maximale pour $v \geq 0,03$ (m) | δ_1 (Doppler) (m^{-1}) | δ_2 (Lorentz) (m^{-1}) | λ (63,15 K) - λ (58,9 K) (fm) | Écart entre deux mesures à 58,9 K (fm) |
|-------------------------|--|---------------------------------|------------------------------------|---|---|---|---|---|---|
| $2p_8 - 4d_5$ | 9 | 869,987598 | 3 | 1149441,673 | 1,15 | 0,78 | 0,09 | + 4 | 4 |
| $2p_9 - 3s_1'''$ | 35 | 876,651646 | 4 | 1140703,955 | 1,10 | 0,82 | 0,10 | + 11 | 4 |
| $2p_8 - 3s_1''''$ | 30 | 898,043867 | 1,5 | 1113531,351 | 1,30 | 0,79 | 0,05 | + 9 | 0 |
| $2p_8 - 3s_1''$ | 8 | 912,495178 | 1,5 | 1095896,203 | 1,10 | 0,73 | 0,11 | + 10 | 12 |
| $2p_6 - 4d_5$ | 50 | 936,465109 | 3,5 | 1067845,444 | 1,20 | 0,77 | 0,08 | + 3 | 12 |
| $2p_7 - 3s_1''''$ | 15 | 954,353482 | 5 | 1047829,782 | 1,35 | 0,71 | 0,07 | + 14 | 0 |
| $2p_7 - 3s_1''$ | 18 | 970,690363 | 3,5 | 1030194,630 | 1,30 | 0,74 | 0,05 | + 8 | 0 |
| $2p_6 - 3s_1''$ | 100 | 985,901632 | 2 | 1014299,975 | 1,10 | 0,83 | 0,05 | + 6 | 8 |
| $3d_1' - 5W$ | 7 | 1059,589554 | 2 | 943761,664 | 1,25 | 0,67 | 0,26 | + 40 | 2 |

Les qualités métrologiques de ces neuf radiations font qu'elles méritent d'être retenues comme de bons étalons secondaires.

2. Dans le spectre du proche infrarouge du mercure 198 émis par un tube sans électrodes contenant 2 mg de Hg 198 et de l'argon sous une pression nominale de 0,25 mmHg ($33,3 \text{ N/m}^2$), il nous est apparu que, dans le domaine exploré, seule la radiation $\lambda = 1,014 \mu\text{m}$ présentait quelque intérêt du point de vue métrologique.

La détermination des variations de la visibilité en fonction de la différence de marche a été faite dans des conditions différentes de la température de refroidissement de la lampe et de la puissance de l'oscillateur.

La longueur d'onde mesurée à une différence de marche de 375 mm est :

$$\lambda_{\text{vide}} = 1,014\ 257\ 171 \mu\text{m} \pm 3 \times 10^{-9} \mu\text{m}$$

(voir Procès-Verbaux C.I.P.M., 37, 1969, p. 48).

QUESTION 3

Avez-vous utilisé et étudié, en métrologie des longueurs, des lasers à gaz stabilisés, commerciaux ou non ? Quelle est leur stabilité, à court terme et à long terme ?

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY (N.R.L.M.), Tokyo

1. Le N.R.L.M. a construit un laser He-²⁰Ne asservi par magnétostriction dans le but d'obtenir une longueur d'onde ($1,15 \mu\text{m}$) dont la stabilité et la reproductibilité soient de 1×10^{-9} . Les flasques sur lesquelles sont montés les deux miroirs sont supportées au moyen de quatre barres en invar, et quatre bobines sont enroulées sur chacune de ces barres. Le signal modulé venant du laser lorsque la longueur d'onde de la cavité est modulée à 70 Hz par un faible courant dans les bobines est utilisé pour asservir automatiquement la

distance des miroirs et le niveau de puissance d'excitation de façon que la longueur d'onde reste très voisine du centre de la raie atomique $1,15 \mu\text{m}$.

La mesure de la stabilité à long terme et de la reproductibilité de cette longueur d'onde est en cours au moyen d'observations des battements entre deux lasers asservis indépendants dont la stabilité à court terme est d'environ 1×10^{-11} par minute.

2. Pour l'utilisation pratique d'un faisceau laser ($\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$) en interférométrie à longue distance, le N.R.L.M. a étudié une nouvelle méthode de stabilisation de la fréquence d'un laser He-Ne non modulé (voir Annexe M 4).

3. D'après la méthode proposée par K. Shimoda, on utilise une cuve extérieure à absorption de méthane pour stabiliser la radiation $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ d'un laser He- ^{22}Ne (voir Annexe M 5).

4. Des études ont été entreprises sur la stabilité de la longueur d'onde de la radiation $0,6328 \mu\text{m}$ émise par des lasers commerciaux unimodes contenant du ^{20}Ne et asservis sur le "Lamb-dip". La variation de la longueur d'onde a été mesurée au moyen d'un interféromètre de Michelson modifié, installé dans un tunnel du Matsushiro Seismic Observatory à Nagano (Fig. 2). La différence de marche dans l'interféromètre est de 20 m et les faisceaux se propagent dans une enceinte à vide de 10 m de longueur sur le bras le plus long de l'interféromètre pour éliminer l'influence des variations de la pression atmosphérique. Les franges d'interférence sont détectées et enregistrées par un système électrique. Les mesures faites sur un laser asservi de la Nippon Electric Co. (NEC 101C) ont montré une stabilité de 1×10^{-8} sur 100 minutes environ.

NATIONAL STANDARDS LABORATORY (N.S.L.), Chippendale

L'asservissement des lasers He-Ne est généralement effectué par les méthodes suivantes :

a) asservissement sur le "Lamb-dip" du profil Doppler de la raie d'émission du néon ;

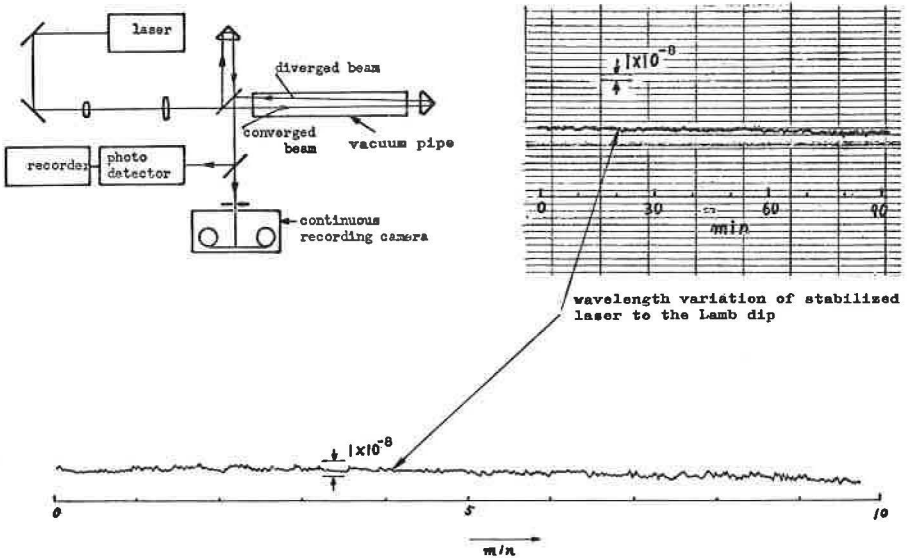


Fig. 2. — Mesure de la variation de la longueur d'onde de lasers asservis au moyen d'un interféromètre de 10 m.

b) asservissement sur la longueur optique d'un étalon Perot-Fabry stable ;

c) asservissement sur la fréquence d'une fine raie d'absorption moléculaire.

La méthode c) semble promettre une stabilité très grande de la fréquence ^(3,4). La méthode a) est largement employée pour les lasers commerciaux dont la reproductibilité de la longueur d'onde est d'environ 1×10^{-7} ⁽⁵⁾. La méthode b) fait intervenir la stabilité de l'étalon Perot-Fabry. Tous ces lasers nécessitent des éléments d'asservissement sur les miroirs du laser pour accorder la cavité, ainsi que des techniques de balayage et des appareillages pour la détection de la phase et la production du signal d'asservissement.

Une forme simple de laser ne nécessitant aucune de ces complications et produisant une fréquence unique stable à 1×10^{-7} ou mieux pendant des périodes relativement longues, présente un certain intérêt pour la métrologie interférentielle. A condition de comparer périodiquement la longueur d'onde émise à celle de la radiation étalon primaire, ce modèle relativement peu onéreux peut fournir une radiation étalon secondaire utile. La reproductibilité de la fréquence d'un tel laser dépend de la stabilité, sur quelques mois par exemple, de la cavité dont la longueur peut être ajustée de façon reproductible par un simple réglage de température ^(6,7,8).

(3) BARGER (R.L.) and HALL (J.L.), Phys. Rev. Letters, 22, 1969, p. 4.

(4) HANES (G.R.) and DAHLSTROM (C.E.), Appl. Phys. Letters, 14, 1969, p. 362.

(5) MIELENZ (K.D.), NEFFLEN (K.F.), ROWLEY (W.R.C.), WILSON (D.C.) and ENGELHARD (E.), Appl. Optics, 7, 1968, p. 289.

(6) BAIRD (K.M.), SMITH (D.S.), HANES (G.R.) and TSUNEKANE (S.), Appl. Optics, 4, 1965, p. 569.

(7) COLLINSON (J.A.), Bell System Techn. J., 40, 1965, p. 1511.

(8) SMITH (D.S.), JONES (L.H.) and BAIRD (K.M.), Appl. Optics, 6, 1967, p. 2195.

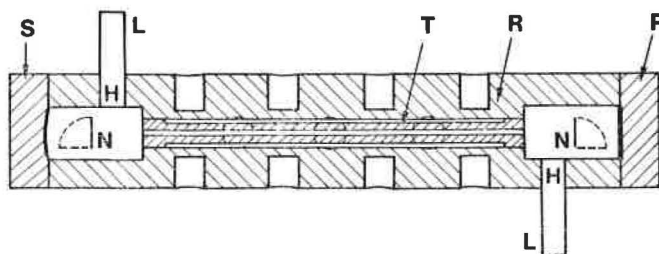


Fig. 3.- Schéma du laser représenté à la figure 4.

R, Tube en silice fondue supportant les miroirs ; P, Miroir plan ; N, Obturateur en nickel ; T, Tube capillaire ; S, Miroir sphérique ; H, Trou conique pour le raccordement du tube latéral L.

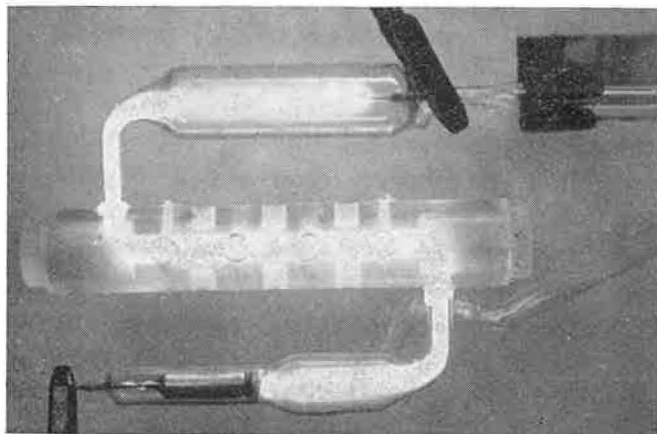


Fig. 4.- Vue du laser He-Ne.

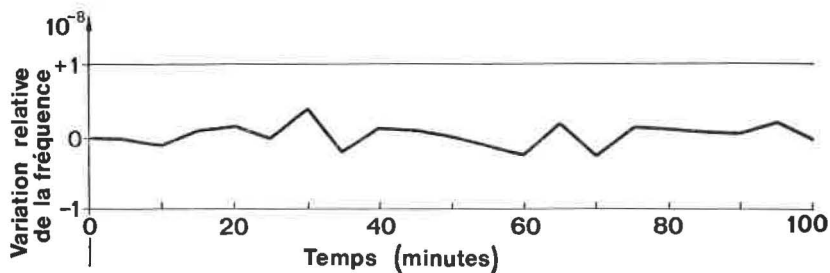


Fig. 5.- Stabilité en fréquence du laser He-Ne.

Les figures 3 et 4 reproduisent le schéma et la photographie d'un laser He-Ne simple et très robuste, réglable par la température, qui a montré une stabilité de fréquence de 1×10^{-8} pendant de nombreuses heures ; ce laser a fonctionné pendant plus de 1 000 heures.

Les caractéristiques de ce laser sont la précision de sa construction qui supprime tout réglage, et sa grande stabilité mécanique. Le capillaire et les miroirs mis en adhérence par contact optique peuvent être remplacés rapidement. Le laser est construit entièrement en silice fondue et le tube capillaire n'est en contact avec le tube extérieur massif que sur de petites surfaces à chaque extrémité. Des trous borgnes radiaux dans le tube extérieur facilitent le transfert de chaleur du capillaire vers le bain d'huile extérieur. Le laser a été conçu pour travailler à une fréquence unique quand un mode axial est très voisin du sommet du profil Doppler de la transition du néon.

Le laser a été étudié au point de vue de sa fréquence et de sa stabilité au moyen d'interféromètres Perot-Fabry à miroirs plans ou sphériques. La stabilité à très court terme (de l'ordre de la seconde) est supérieure à 5×10^{-9} . La figure 5 montre la stabilité de la fréquence sur une période d'observation continue de 100 minutes ; la précision des mesures était d'environ 5×10^{-9} . La reproductibilité de la fréquence sur un mois était de $\pm 3 \times 10^{-8}$, la température à la surface extérieure du tube dans le bain d'huile étant maintenue constante à $\pm 0,05$ degré. C'est le système de contrôle de la température du bain d'huile qui, actuellement, limite les performances de ce laser, mais il pourrait être amélioré.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (P.T.B.), Braunschweig

On a étudié divers lasers commerciaux hélium-néon monomodes asservis, particulièrement le modèle 119 b de Spectra-Physics. La stabilité à court terme a été trouvée supérieure à 1×10^{-8} ; la stabilité au cours d'une période de 500 heures de fonctionnement est de l'ordre de 2×10^{-8} . On a également étudié les variations de la longueur d'onde en fonction de la pression pour le laser Spectra-Physics,

modèle 119 b. Deux séries de mesures ont été effectuées : l'une à pression constante de ^{20}Ne (47 N/m^2) en variant la pression de ^3He de 133 à 533 N/m^2 , l'autre à pression constante de ^3He (327 N/m^2) en variant la pression de ^{20}Ne entre 27 et 160 N/m^2 . Les équations suivantes ont été déduites de ces mesures :

$$1) \quad \lambda_{\text{vide}} = (0,632\ 991\ 499 - 30,64 p_{\text{He}}) \mu\text{m}$$

$$2) \quad \lambda_{\text{vide}} = (0,632\ 991\ 433 - 19,4 p_{\text{Ne}}) \mu\text{m}$$

(pour p_{He} et p_{Ne} en Torr).

Un laser à ^{136}Xe ionisé a été construit. La pression est réglée à environ 5 N/m^2 ($\approx 40 \text{ mTorr}$) par saturation à la température du point d'ébullition de l'oxygène. Ce laser émet simultanément trois radiations (rouge, verte et bleue) correspondant aux transitions

$$6 p' \ ^2\text{F}^0_{5/2} - 6 s' \ ^2\text{D}_{3/2}$$

$$6 p \ ^4\text{D}^0_{5/2} - 6 s \ ^4\text{P}_{3/2}$$

$$6 p \ ^4\text{D}^0_{3/2} - 6 s \ ^4\text{P}_{3/2}$$

Les valeurs provisoires des longueurs d'onde dans le vide sont :

$$\lambda_{\text{rouge}} = 6\ 272,546\ 4 \times 10^{-10} \text{ m}$$

$$\lambda_{\text{verte}} = 5\ 420,654\ 9 \times 10^{-10} \text{ m} ;$$

pour la radiation bleue on a obtenu la valeur approximative suivante :

$$\lambda_{\text{bleue}} = 4\ 604,31.. \times 10^{-10} \text{ m.}$$

Jusqu'ici, ce laser a été stabilisé par réglage manuel en utilisant un interféromètre de Perot-Fabry. Deux possibilités d'asservissement sont étudiées : l'une par référence aux raies naturelles, l'autre par référence à une raie d'absorption. Le laser à ^{136}Xe ionisé est particulièrement intéressant pour la méthode des coïncidences (voir Zeitschrift für Naturforschung, 25a, 1970, p. 156).

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES (B.I.P.M.), Sèvres

Le B.I.P.M. possède deux lasers He-Ne asservis Spectra-Physics, modèle 119.

L'un d'eux a été étudié soigneusement pendant un mois environ au cours des 170 premières heures d'allumage (voir Procès-Verbaux C.I.P.M., 37, 1969, pp. 50-51). Quatorze mesures de la longueur d'onde ont donné le résultat moyen :

$$\lambda_{\text{vide}} = 0,632\ 991\ 410\ \mu\text{m} \text{ (mars 1969)}$$

avec des écarts ne dépassant pas 2×10^{-9} en valeur relative. Aucune dérive appréciable n'a été décelée durant cette période.

Dix mois plus tard, après environ 400 heures d'allumage, nous avons obtenu :

$$\lambda_{\text{vide}} = 0,632\ 991\ 415\ \mu\text{m} \text{ (janvier 1970)}$$

Le deuxième laser a suivi la même évolution :

$$\lambda_{\text{vide}} \begin{cases} = 0,632\ 991\ 411\ \mu\text{m} \text{ (mars 1969)} \\ = 0,632\ 991\ 414\ \mu\text{m} \text{ (janvier 1970)} \end{cases}$$

ce laser ayant fonctionné environ 300 heures entre ces deux mesures.

En ce qui concerne la stabilité à court terme, nous avons observé des fluctuations de la longueur d'onde de quelques 10^{-9} en valeur relative pendant des périodes de l'ordre de 1 heure.

AUTRES LABORATOIRES

Le Conseil National de Recherches, Ottawa, a travaillé avec des lasers He-He thermorégulés de construction stable et les a trouvés pratiques pour la métrologie usuelle ; leur stabilité est d'environ 1×10^{-8} en valeur relative (Appl. Optics, 4, 1965, p. 569).

National Bureau of Standards, Washington : voir Annexe M 6 et Appl. Optics, 7, 1968, p. 289.

National Physical Laboratory, Teddington : voir Annexe M 12.

QUESTION 4

Quelles études avez-vous faites sur l'utilisation d'une raie d'absorption saturée pour stabiliser la longueur d'onde d'une raie d'émission ?

Quels sont les facteurs qui déterminent la stabilité, et quelle est cette stabilité ?

Quelles peuvent être les applications de cette technique ?

Le Conseil National de Recherches, Ottawa, poursuit l'étude de lasers He-Ne asservis sur la raie $0,633 \mu\text{m}$ de l'iode et sur la raie $3,39 \mu\text{m}$ du méthane ; des expériences préliminaires sont faites également avec des lasers à CO_2 asservis sur la raie $10,6 \mu\text{m}$ du CO_2 (Metrologia, 5, 1969, p. 32 et Appl. Phys. Letters, 14, 1969, p. 362).

Au National Physical Laboratory, Teddington, des expériences sont en cours concernant la stabilisation par absorption saturée de longueurs d'onde de lasers. On est en train d'appliquer cette technique à la transition visible du laser He-Ne ($\lambda = 0,633 \mu\text{m}$) par utilisation de l'absorption dans l'iode, et à la transition infrarouge ($\lambda = 3,39 \mu\text{m}$) par utilisation du méthane. Nous ne disposons pas encore de résultats concernant les performances de ces deux systèmes.

National Bureau of Standards, Washington : voir Annexes M 6 et M 14.

QUESTION 5

Quels sont les changements et les nouveautés, dans la technique des mesures précises de longueur, entraînés par la définition du mètre de 1960 ?

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES (N.R.C.), Ottawa

Depuis 1960, les étalons à traits et à bouts sont mesurés directement en fonction de la longueur d'onde étalon primaire $2p_{10} - 5d_5$ du krypton 86 (Metrologia, 4, 1968, p. 154).

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (N.P.L.), Teddington

Les mesures précises de longueur au N.P.L. étant réparties en plusieurs catégories qui n'ont pas été également affectées par le changement de la définition du mètre, il nous paraît plus simple d'établir la liste de ces catégories séparément et de les étudier chacune leur tour.

Les catégories sont :

- a) Calibres et étalons à bouts jusqu'à 1500 mm de longueur, destinés à l'industrie ;
- b) Étalons à traits de précision et réseaux métrologiques linéaires jusqu'à 1000 mm de longueur, avec des subdivisions jusqu'au millimètre ;
- c) Petites échelles et petits réseaux de 1 mm à 150 mm, avec des subdivisions de 10 μm , par exemple micromètres-objets, chambres pour numération globulaire.
- d) Rubans géodésiques jusqu'à 100 m ;
- e) Longues distances jusqu'à 3 km, mesurées avec le "Mekometer" du N.P.L.

a). Mesure des étalons à bouts et des calibres. - L'achat par le N.P.L. d'un comparateur interférentiel Kösters-Zeiss de 1 m est une conséquence directe de la nouvelle définition du mètre de 1960. Cet appareil peut être utilisé pour des mesures directes de longueurs jusqu'à 500 mm en fonction des

longueurs d'onde du krypton 86, et de longueurs jusqu'à 1 m par l'emploi des interférences en lumière blanche. Quatre nouvelles séries d'étalons à bouts (deux de dimensions métriques et deux de dimensions en inches) ont été achetées par le N.P.L. pour être étalonnées avec cet appareil et l'exactitude des déterminations faites au N.P.L. sera améliorée du fait de ces nouveaux étalons. Nous envisageons de mesurer les étalons à bouts industriels directement en fonction du krypton 86 ou en utilisant la longueur d'onde d'un laser stabilisé ; un nouveau comparateur pour étalons à bouts utilisant un laser et destiné à être utilisé avec l'appareil Kösters-Zeiss est en cours de construction au N.P.L.

b). Mesure des étalons à traits et des réseaux métrologiques. - La définition du mètre de 1960, les lasers à gaz de longueur d'onde stabilisée, la commodité des mesures automatiques et l'usage de plus en plus répandu de microscopes photoélectriques dans l'industrie de précision ont contribué à la mise en oeuvre au N.P.L. d'un interféromètre automatique de mesures de règles qui est employé pour vérifier les étalons à traits et les réseaux métrologiques linéaires en fonction de la longueur d'onde de la radiation rouge d'un laser hélium-néon stabilisé. Cet appareil a rendu pratiquement superflues les laborieuses comparaisons des règles de référence du N.P.L. à l'aide de comparateurs mécaniques, elle a accru l'exactitude d'ensemble et a rendu plus rapides les étalonnages pour l'industrie.

c). Mesure des petites échelles et des petits réseaux. - Actuellement, les micromètres-objets, les chambres de numération globale et les petites échelles similaires ayant des divisions jusqu'à 10 μm sont contrôlés par rapport à une vis étalonnée avec un microscope mobile. On envisage cependant d'utiliser un nouvel appareil à laser avec impression automatique du comptage de franges d'interférence et de la partie fractionnaire correspondante.

d). Mesure des rubans géodésiques. - Jusqu'à maintenant les rubans géodésiques jusqu'à 50 m de long étaient comparés aux rubans de référence en invar du N.P.L. qui étaient mesurés à des intervalles de temps réguliers avec une règle à traits

en invar de 4 m. Cette règle de 4 m était comparée tous les ans à des étalons à traits de 1 m, eux-mêmes vérifiés au moyen du Mètre étalon en platine iridié N° 16. On est en train de remplacer cette méthode très laborieuse par une mesure directe des rubans au moyen d'un interféromètre à laser en cours de construction et qui sera employé avec des microscopes visuels sur la base murale existante.

e). Mesures avec le "Mekometer" du N.P.L. - L'utilisation du "Mekometer" du N.P.L. pour les longues distances jusqu'à 3 km n'a pas été affectée par la définition du mètre de 1960.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (P.T.B.), Braunschweig

Pas de changements ou de nouveautés importants pour les mesures des calibres jusqu'à 1 m. Les calibres de 100 à 1000 mm sont mesurés depuis longtemps avec la lampe à krypton 86. Pour les calibres jusqu'à 100 mm, une lampe à cadmium 114 du type Osram est utilisée depuis peu (voir Question 2a). L'appareil pour la mesure des calibres à partir d'une longueur d'onde existait bien avant 1960.

Pour les mesures interférentielles d'étalons à traits, divers équipements ont été récemment réalisés (voir Question 6).

QUESTION 6

Brève description des méthodes et des appareils en usage ou en préparation, pour l'étude des étalons de longueur d'onde, et pour la mesure d'étalons à bouts, d'étalons à traits, de la longueur de déplacements, et cela pour des longueurs courtes, moyennes, ou grandes ?

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (N.P.L.), Teddington

1. Appareils pour la mesure des étalons de longueur d'onde. - Les étalons de longueur d'onde sont comparés entre eux à l'aide d'un interféromètre de Perot-Fabry à

balayage par variation de pression. Les deux sources lumineuses éclairent des collimateurs séparés à travers un disque obturateur tournant qui transmet alternativement chacun des faisceaux. Sur les deux trajets optiques semblables, les radiations sont isolées par des filtres et des prismes ; elles sont ensuite mélangées à l'aide d'une lame semi-réfléchissante avant de passer à travers un étalon Perot-Fabry de 84 mm. Cet étalon est placé dans un caisson où les variations de pression sont produites par un piston mû par un moteur. La lumière correspondant à la partie centrale de la figure d'interférence est reçue par un photomultiplicateur suivi d'un système amplificateur, de sorte que les intensités instantanées peuvent être enregistrées sur ruban perforé. Habituellement, trois franges d'interférence de chaque source sont balayées. Les enregistrements sont ensuite analysés par un ordinateur qui détermine les positions relatives des franges et calcule le rapport de leurs longueurs d'onde. En substance, cet appareil est le même que celui qui a été utilisé pour les mesures de longueurs d'onde étalons secondaires présentées à la 3^e session (1962) du C.C.D.M. Le même appareil est utilisé avec des conditions légèrement différentes pour les mesures de profils spectraux.

Pour l'étude de la structure des modes des lasers nous utilisons un interféromètre à haute résolution à balayage (Spectra-Physics, 420). Les mesures des caractéristiques de la stabilité de fréquence sont effectuées par des méthodes de battements en utilisant un laser de référence. Actuellement, ces observations sont faites avec un analyseur de spectre de fréquence (Hewlett-Packard 8553B/8552A) qui couvre le domaine jusqu'à 110 MHz, mais on est en train d'améliorer le système pour pouvoir mesurer les battements avec un compteur bi-directionnel sur le même domaine de fréquence.

2. Appareils en usage ou en construction pour la mesure des étalons à bouts.

a) Le comparateur interférentiel Kösters-Zeiss de 1 m est utilisé pour mesurer les calibres de référence jusqu'à 1 m de longueur. Le faisceau lumineux d'une lampe à krypton 86 est séparé en deux parties par un double prisme ; une partie est réfléchiée par une des extrémités du calibre à

mesurer et par un petit plan mis en adhérence sur son autre extrémité ; l'autre partie du faisceau est réfléchié par un plan de référence (et aussi par un second calibre mis en adhérence sur le plan, si l'appareil est utilisé comme comparateur). Les deux parties du faisceau se recombinent sur l'interface du prisme de sorte qu'une moitié du champ est réfléchié sur l'autre, et des franges sont formées par l'angle optique entre les deux plans placés symétriquement et aussi par l'angle optique entre le calibre et le centre du plan de référence (ou entre les deux calibres quand l'appareil est utilisé comme comparateur). Le décalage entre les deux systèmes de franges donne une mesure de la longueur cherchée du calibre, cette longueur étant obtenue directement en longueurs d'onde dans le vide du krypton 86 grâce à un réfractomètre incorporé au comparateur et en utilisant une version modifiée de la méthode des coïncidences de J.-R. Benoît.

b) L'interféromètre NPL-Hilger est utilisé au N.P.L. pour les mesures de routine de calibres jusqu'à 100 mm de longueur. L'interféromètre est construit sur le principe de Fizeau, un miroir semi-réfléchissant de référence formant un angle avec les surfaces d'une série d'environ 18 calibres et la surface d'un plan de base unique sur lequel ils sont mis en adhérence. L'estimation du décalage des franges d'une part entre les calibres et le miroir de référence, d'autre part entre le plan de base et le miroir de référence, donne la mesure de la longueur des calibres. On utilise les longueurs d'onde de lampes à cadmium et à mercure 198, et la méthode des coïncidences de J.-R. Benoît pour calculer ces longueurs.

c) Un nouveau comparateur pour étalons à bouts est en construction ; il sera utilisé pour comparer des séries de six étalons jusqu'à 1250 mm de longueur à un petit étalon de référence de 50 à 100 mm, la différence entre l'étalon à mesurer et l'étalon de référence étant déterminée par les interférences au moyen de la radiation rouge d'un laser He-Ne stabilisé. Les étalons sont montés sur un plateau qui peut tourner de façon que chaque étalon vienne se placer, à son tour, entre deux palpeurs sensibles électromécaniques étalonnés. L'un des palpeurs peut être déplacé automatique-

ment le long du banc de la machine et son déplacement par rapport au second palpeur est mesuré dans un interféromètre à deux faisceaux. Le traitement des résultats est relativement simple, mais peut être exécuté par un ordinateur pour plus de facilité.

d) Divers autres comparateurs optico-mécaniques, d'une amplification d'environ 30 000, sont utilisés en plus des interféromètres décrits ci-dessus.

3. Appareils en usage pour la mesure des étalons à traits. - Un interféromètre pour la mesure automatique des étalons à traits est utilisé pour déterminer les intervalles des traits de règles et de réseaux métrologiques par rapport à la longueur d'onde de la radiation rouge d'un laser He-Ne stabilisé. L'échelle à mesurer est montée sur un chariot à déplacement automatique qui constitue un bras d'un interféromètre à deux faisceaux. Les traits sont pointés par un microscope photoélectrique (ou une tête de lecture avec un réseau de référence) qui fournit un signal commandant le départ et l'arrêt d'un compteur de franges électronique. La lumière du laser est séparée en deux faisceaux par une lame semi-réfléchissante montée sur une tête fixe portant le microscope ; l'un des faisceaux parcourt une distance fixe à travers cette tête et l'autre faisceau est réfléchi par des miroirs sur le chariot mobile au niveau de la règle après avoir parcouru la longueur de la règle ; ces miroirs sont montés tout près de la butée sur laquelle la règle est en contact. Les deux faisceaux sont recombinaés sur le détecteur pour former des interférences ; le nombre de franges qui défilent pendant que le chariot parcourt la longueur correspondant à un intervalle sur la règle est compté électroniquement et enregistré sur ruban perforé en même temps que l'excédent fractionnaire qui est estimé à partir de mesures de temps. Les résultats sont traités par ordinateur pour fournir une table d'étalonnage ; cet étalonnage est obtenu à $\pm 0,4 \mu\text{m}$ pour une règle en acier de 1 m de qualité convenable⁽⁹⁾.

(9) ROWLEY (W.R.C.) and STANLEY (V.M.), Machine Shop, 26, 1965, pp. 430-432 ; Instrument Practice, 19, 1965, pp. 1106-1107 ; Machinery and Prod. Engng., 107, 1965, p. 780.

4. Appareil pour la mesure des rubans géodésiques.—

La base murale du N.P.L. est en cours d'adaptation pour que les microscopes visuels puissent être utilisés conjointement avec un interféromètre à laser pour déterminer directement la longueur des rubans au lieu d'employer les rubans de référence du N.P.L. La base est constituée d'un banc de 50 m en briques construit dans un mur intérieur qui est renforcé par des entretoises. Le banc est muni de supports à rouleaux pour que les rubans puissent être soutenus par caténaire, ainsi que de poulies pour leur mise sous tension. Le long du banc sont fixés deux fils en invar dont la variation de flèche est utilisée comme indication de la variation à court terme de la longueur du banc. A l'origine le banc était équipé de microscopes fixés sur le mur ; ceux-ci sont maintenant remplacés par deux microscopes visuels similaires montés sur des supports qui peuvent se déplacer sur des rails le long du banc. Ces supports de microscopes portent les pièces d'optique constituant un interféromètre à deux faisceaux : l'un des supports porte un trièdre optique, l'autre les lames séparatrices, les pièces d'optique fixes pour le faisceau de référence et les photodétecteurs, de sorte que les franges d'interférence produites puissent être comptées électroniquement. Aucun étalon matériel n'est nécessaire et les mesures peuvent donner directement la longueur des rubans au moyen d'un ordinateur si on le juge utile.

5. Appareil pour la mesure des longueurs jusqu'à

3 km.— Le "Mekometer III" du N.P.L. est un instrument électro-optique pour la mesure de telles distances. Il utilise un faisceau de lumière modulée en polarisation à la fréquence d'environ 500 MHz. Le "Mekometer" et sa cible constituée d'un trièdre optique réflecteur sont montés à chaque extrémité de la distance à mesurer et la mesure est obtenue en comparant la phase de la modulation sur le faisceau émis à celle du faisceau de retour. L'instrument compense automatiquement les variations de l'indice de réfraction de l'air sur la distance mesurée et donne une exactitude de

$\pm (0,1 \text{ mm} + \frac{d}{3 \times 10^5})$, où d est la distance mesurée en mm. Le second terme de cette formule peut être réduit à environ $1/3$ de la valeur donnée en mesurant la température de l'air le long de la distance mesurée. L'appareil est étalonné par

rapport aux étalons de fréquence du N.P.L. en admettant une valeur connue de la vitesse de la lumière.

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY (N.R.L.M.), Tokyo

1. Un nouvel interféromètre a été installé il y a deux ans pour les comparaisons précises de longueurs d'onde ; il est du type "ruban de Möbius" et permet les observations simultanées de deux radiations sans aucune erreur systématique, sauf celle qui provient du défaut de collimation du trou de sortie.

2. Deux sortes de comparateurs interférentiels ont été mis en oeuvre pour la mesure des étalons à bouts. Dans l'un, destiné aux mesures de routine, on peut placer quinze calibres à la fois de longueur jusqu'à 250 mm⁽¹⁰⁾. Les calibres, ainsi qu'une cellule à vide destinée à la mesure de l'indice de réfraction de l'air, sont montés sur une table rotative et amenés successivement dans le champ de l'interféromètre. L'exactitude des mesures est supérieure à 0,01 μ m.

L'autre interféromètre peut admettre quatre calibres à la fois dont la longueur peut atteindre 1 m (fig. 6) ; cet appareil permet de déterminer la valeur absolue des calibres, aussi bien que leurs différences de longueur dans diverses combinaisons. L'exactitude est de l'ordre de quelques centièmes de micromètres pour des calibres de longueur supérieure à 250 mm.

3. Les mesures d'étalons à traits pouvant atteindre 2 m sont faites dans un nouveau comparateur interférentiel (fig. 7). Les traits sont repérés à l'aide d'un microscope photoélectrique et d'un système optique placé sur le chariot mobile qui se déplace à une vitesse uniforme. Les franges produites dans un interféromètre à trièdres optiques sont transformées en impulsions électriques qui permettent de mesurer le déplacement du chariot, l'unité étant 1/16 de longueur d'onde. Les impulsions sont totalisées par un compteur qui produit une nouvelle impulsion chaque fois qu'il a totalisé un nombre correspondant à la longueur nominale mesurée ; l'écart entre l'impulsion donnée par le compteur

(10) SAKURAI (Y.) and SEINO (S.), A gauge interferometer for the routine measurement of block gauges up to 250 mm. Bull. Nat. Res. Lab. Metrology. N° 14. April 1967. pp. 34-38.

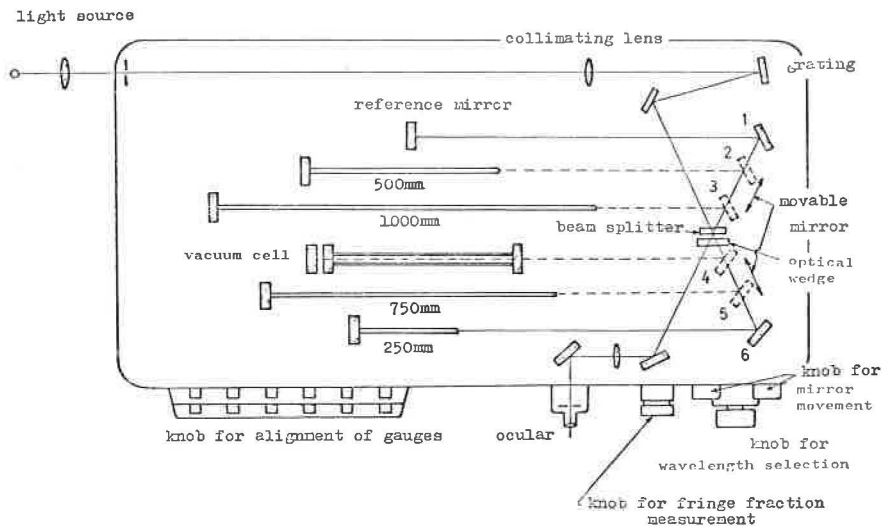


Fig. 6. — Schéma de l'interféromètre de 1 m du N.R.L.M. pour étalons à bouts.

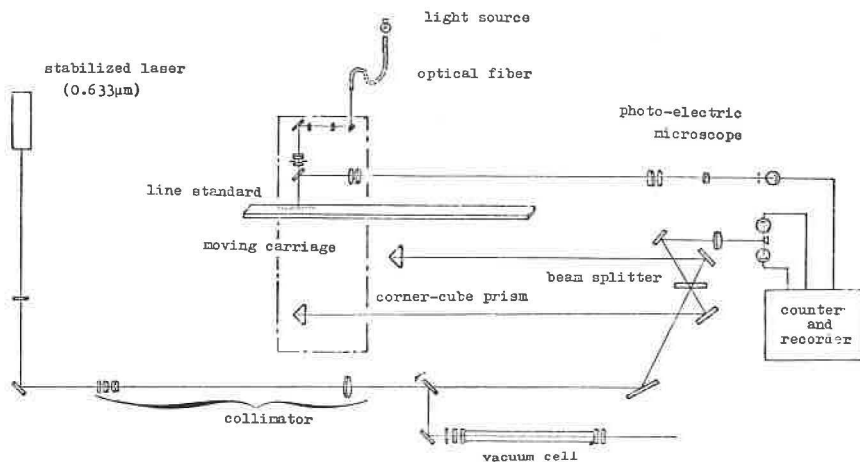


Fig. 7. — Schéma de l'interféromètre à laser du N.R.L.M. pour la mesure des étalons à traits jusqu'à 2 m.

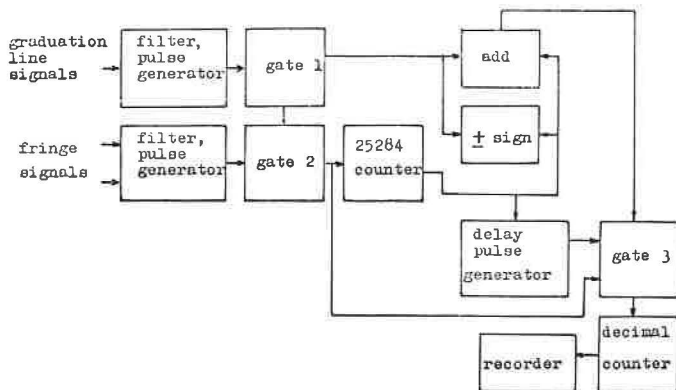


Fig. 8. — Schéma de principe de l'ensemble.

et celle donnée par le microscope photoélectrique est enregistré par comptage des impulsions produites par les franges ; cet écart donne la position du trait par rapport à sa position nominale. La figure 8 représente le schéma de principe de l'ensemble.

NATIONAL STANDARDS LABORATORY (N.S.L.), Chippendale

1. Interféromètre de Perot-Fabry plan-parallèle à balayage. - Un nouveau modèle de notre interféromètre à écartement variable et à balayage a été construit pour permettre des comparaisons rapides et précises de longueurs d'onde, des mesures de variations de longueurs d'onde et l'examen rapide des composantes spectrales de la lumière d'un laser.

Ce modèle a les caractéristiques particulières suivantes :

a) L'appareil est sous vide et l'écartement des miroirs peut être ajusté de façon continue de 0 à 0,5 m par commande à distance.

b) Le maintien du parallélisme des miroirs est obtenu par une technique de balayage tournant⁽¹¹⁾.

c) L'incorporation d'un microscope photoélectrique et d'une échelle étalonnée en silice fondue permet de connaître rapidement l'entier de l'ordre d'interférence correspondant à la distance des miroirs.

L'appareil a été utilisé pour la mesure des longueurs d'onde des radiations émises par une lampe à mercure 198 lors d'une étude du profil spectral de la raie de résonance 422,6 nm du calcium et pour l'étude de la fréquence et de la stabilité d'un laser stabilisé thermiquement.

2. Interféromètre de Perot-Fabry sphérique à balayage (PFS)⁽¹²⁾. - On a réalisé un système dans lequel un interféromètre de Perot-Fabry sphérique, placé dans une enceinte sous vide et thermorégulée, sert d'élément de référence

(11) BRUCE (C.F.), Appl. Optics, 5, 1966, p. 1447.

(12) BRUCE (C.F.), Appl. Optics, 9, 1970, p. 743.

passif, fixe et stable. Les petits changements de l'ordre d'interférence dans l'étalon PFS sont déterminés par la mesure du changement de diamètre des franges d'interférence circulaires. L'étalonnage initial de l'étalon est fait par changement de pression de l'air au moyen d'un piston à vis micrométrique qui est lui-même étalonné par les interférences. Les pointés précis des franges sont faits photoélectriquement par balayage des franges sur l'ouverture du détecteur, ce balayage étant obtenu par oscillation de la lentille de projection à l'extérieur de l'enceinte. Les avantages du PFS sur son équivalent à miroirs plans-parallèles sont : 1°) la construction facile d'étalons fixes et stables de qualité satisfaisante ; 2°) les propriétés de formation des images de l'étalon fournissent un moyen d'alignement simple et précis, et réduisent les erreurs dues à l'éclairement bien au-dessous de 1×10^{-8} pour une source comme la lampe à krypton 86. Avec la lumière spatialement cohérente d'un laser, l'éclairement correct est repéré avec plus de précision encore par la forme des franges à deux ondes superposées aux franges à ondes multiples. Ce système a montré facilement que l'on peut reproduire à 1×10^{-8} , d'un jour à l'autre et sur plusieurs mois, la même longueur d'onde à partir de deux lampes à krypton 86 conformes aux spécifications. Ce système est actuellement utilisé pour des études sur la stabilité à long terme de la longueur d'onde d'un laser stabilisé thermiquement, ainsi que pour la mesure des coefficients de dilatation et de la stabilité à long terme des étalons passifs fabriqués avec différents matériaux à faible coefficient de dilatation, tels que la silice fondue, le Cer-Vit et le Corning ULE (silicate de titane).

3. Interféromètre Kösters-NSL. - Cet instrument est utilisé régulièrement pour la mesure des étalons à bouts jusqu'à 0,5 m de longueur au moyen des radiations étalons primaire et secondaires de longueur d'onde. Récemment, une mesure intéressante a été celle de la longueur des calibres spéciaux utilisés pour la détermination absolue de "g" ; la précision des mesures (effectuées dans l'air) est 1×10^{-7} pour un calibre de 460 mm.

4. Interféromètre du N.S.L. pour étalons à traits

de 1 m .- Cet appareil a été utilisé pour étalonner les règles étalons à traits de 1 m du laboratoire en fonction de l'étalon primaire⁽¹³⁾. La précision des mesures est en général de 1×10^{-7} . Les mesures interférentielles seules sont précises à 1×10^{-8} ; les corrections appropriées pour l'indice de réfraction de l'air sont calculées pour les conditions expérimentales (valeurs mesurées de la température, de la pression atmosphérique et du degré hygrométrique) en utilisant les formules de Edlén et de Barrell et Sears. Un réfractomètre interférentiel est en cours de construction et sera installé dans l'enceinte de l'interféromètre pour réduire l'incertitude sur la correction d'indice de réfraction de l'air qui est considérée comme étant la principale source d'erreur.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (P.T.B.), Braunschweig

Deux interféromètres de Perot-Fabry à balayage sont utilisés pour les études de profils et de déplacements spectraux. Le balayage est effectué par variation de pression ou par déformation mécanique en appliquant des forces électrostatiques à l'une des lames de l'interféromètre.

Pour les mesures fondamentales de longueurs d'onde la P.T.B. utilise le comparateur de longueurs d'onde dans le vide de Kösters, bien connu (Zeitschrift für Instrumentenkunde, 67, 1959, p. 59).

Cet instrument sert principalement aux mesures d'étalons à bouts de 100 à 1000 mm, tandis que les étalons jusqu'à 100 mm sont mesurés depuis longtemps en longueurs d'onde dans l'air à l'aide de l'interféromètre de Kösters construit en 1925.

Pour les mesures d'étalons à traits jusqu'à 1 m un comparateur interférentiel à déplacement a été récemment

(13) CIDDOR (P.E.) and BRUCE (C.F.), Metrologia, 2, 1967, p. 109.

conçu. L'interféromètre est du type de Michelson. Le déplacement du microscope photoélectrique est mesuré en appliquant la méthode des excédents fractionnaires et des coïncidences. Les observations sont faites avec la lampe à krypton 86, dans l'air. L'indice de réfraction de l'air est déterminé par les interférences à l'aide d'une chambre à vide (P.T.B.-Mitteilungen, 1, 1969, p. 3).

Un interféromètre à laser à comptage de franges construit à la P.T.B. est utilisé pour l'étalonnage des règles divisées.

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES (B.I.P.M.), Sèvres

1. L'appareil couramment utilisé au B.I.P.M. pour l'étude des étalons à traits ou à bouts jusqu'à 1 m de longueur est le comparateur interférentiel à microscopes photoélectriques dont la partie interférentielle a été perfectionnée⁽¹⁴⁾.

Essentiellement cet appareil comprend deux interféromètres qui peuvent être utilisés simultanément : d'une part un interféromètre de Michelson classique à deux miroirs plans permettant les pointés statiques de la phase des interférences par une méthode photoélectrique, d'autre part un interféromètre à deux trièdres optiques permettant de mesurer les déplacements par comptage de franges d'une radiation laser. Le trièdre et le miroir plan mobiles sont fixés sur une pièce métallique rendue solidaire de la règle ou du calibre à mesurer. (A paraître dans Metrologia).

Pour la mesure de petits calibres jusqu'à 100 mm nous utilisons toujours l'interféromètre à franges de Fizeau construit par A. Pérard.

2. La détermination de la longueur de la base géodésique murale de 24 m du B.I.P.M. s'effectue par une méthode interférentielle⁽¹⁵⁾. On utilise un interféromètre de Michelson dont un des miroirs se déplace le long de la

⁽¹⁴⁾ CARRÉ (P.), Metrologia, 2, 1966, pp. 13-23.

⁽¹⁵⁾ CARRÉ (P.) et HAMON (J.), Metrologia, 2, 1966, pp. 143-150.

base. La différence de marche \pm (2 x 12 m) est mesurée par multiplication optique : un étalon de Perot-Fabry de 1 m est placé en série avec le Michelson ; on observe les franges de superposition, en lumière blanche, lorsque les différences de marche sont multiples l'une de l'autre. L'étalon de Perot-Fabry de 1 m est mesuré par comparaison avec un premier étalon de Perot-Fabry de 0,25 m, lui-même mesuré directement avec la radiation étalon primaire.

AUTRES LABORATOIRES

Conseil National de Recherches, Ottawa : voir Metrologia, 4, 1968, p. 142 ; 4, 1968, pp. 154-161.

National Bureau of Standards, Washington : voir Annexes M 6 et M 11.

QUESTION 7

Avez-vous eu l'occasion de comparer le résultat d'une mesure précise de longueur faite dans votre laboratoire au résultat d'un autre laboratoire ?

Peut-on organiser des mesures comparatives internationales, et par quelle sorte d'étalon peut-on matérialiser la longueur à transporter d'un laboratoire à un autre ?

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (N.P.L.), Teddington

Un certain nombre de comparaisons utiles de longueurs ont été faites sur l'initiative du B.I.P.M. ou de quelques firmes commerciales. La section des longueurs du N.P.L. a aussi participé à plusieurs comparaisons entre laboratoires dans le cadre de ses activités. Nous considérons que les étalons à bouts de section rectangulaire et les étalons à traits de section en X ou en H sont en général acceptables pour des comparaisons entre laboratoires.

Une comparaison de rubans géodésiques de 50 m serait intéressante, mais nous ne sommes pas certains que tous les laboratoires peuvent étudier des rubans de cette longueur. Un échange de micromètres-objets de 1 mm serait aussi très intéressant.

Le N.P.L. a acheté un étalon à bouts de 1 m à section rectangulaire ainsi qu'un étalon de 1,5 m en vue de ce genre de comparaison. Nous serions également en mesure de fournir un ruban d'invar de 24 m pour une comparaison circulaire entre les laboratoires, mais nous ne pourrions disposer ni d'un ruban d'invar de 50 m ni d'un étalon à traits car nous n'en possédons qu'un petit nombre.

Voici quelques informations sur des comparaisons d'étalons de longueur dont le N.P.L. possède les résultats :

a) Étalons à bouts

- 1948-52 Mesure de quatre calibres (22-100 mm) fournis par le N.P.L. et mesurés par les interférences au N.P.L. et au B.I.P.M.
- 1952-54 Mesure de trois calibres (50-100 mm) fournis par le N.P.L. ; comparaisons proposées par le B.I.P.M. ; les mesures interférentielles ont été faites par le Bureau Fédéral des Poids et Mesures (Suisse), le B.I.P.M., le Central Inspection Institute of Weights and Measures (Japon), le D.A.M.G. (Allemagne de l'Est), le Laboratoire Central de l'Armement (France), le N.P.L. (Grande-Bretagne) et la P.T.B. (Allemagne de l'Ouest).
- 1963-65 Mesure de trois calibres spéciaux de section circulaire en Nitralloy (16 pouces, 18 pouces, 48 cm), faite à l'initiative de la Société Moore Special Tools Standards qui a fourni les calibres ; les mesures ont été faites par le B.I.P.M., le N.B.S., le N.P.L. et la P.T.B.
- 1950-70 Diverses mesures de calibres de 4 pouces et de 100 mm mesurés au N.P.L. et par C.E. Johansson (Suède).

b) Rubans géodésiques

- 1955-56 Mesure par le N.P.L., le N.B.S. et le B.I.P.M. d'un ruban de 24 m fourni par ce dernier ; le coefficient de dilatation a aussi été mesuré.

c) Étalons à traits

Le Prototype britannique du mètre (N° 16) a été comparé durant ces dernières années avec le nouvel étalon de longueur de 1960 par le N.R.C. (Canada) et par le N.P.L. Le N.R.C. a mesuré avec le même interféromètre d'autres étalons à traits qui avaient été auparavant mesurés au B.I.P.M. et au N.B.S., de sorte qu'on a obtenu un rattachement indirect des résultats des quatre laboratoires.

La Société Bausch and Lomb (U.S.A.) a pris l'initiative d'une comparaison internationale de la longueur d'une règle de 500 mm à section rectangulaire. Un certain nombre de grands laboratoires, comprenant le N.R.C. et le N.B.S., ont accepté d'y participer et nous le ferons aussi si nous pouvons adapter notre appareil pour la mesure de cette règle dont la section est inhabituelle.

d) Mesure d'une base de 0,6 km

Le "Mekometer" du N.P.L. a été utilisé pour mesurer une base de 0,6 km au C.E.R.N. (Genève). Cette base est habituellement étalonnée au moyen de rubans ou de fils géodésiques mesurés au B.I.P.M., de sorte que la mesure avec le "Mekometer" a donné un recoupement intéressant entre les différents procédés de mesure. La température de l'air le long de la base était mesurée afin d'atteindre la plus haute précision permise par l'appareil.

e) Lasers

En 1966, la longueur d'onde d'un laser He-Ne asser-vi (Spectra-Physics, modèle 119), fourni par le N.B.S., a été comparée à l'étalon primaire du krypton 86 au N.P.L. et à la P.T.B. après avoir été mesurée au N.B.S. Les résultats de cette comparaison (Appl. Optics, 7, 1968, pp. 289-293) confirment que les trois laboratoires peuvent exécuter de telles mesures avec un accord de 1×10^{-8} correspondant à la précision inhérente à l'étalon primaire.

NATIONAL STANDARDS LABORATORY (N.S.L.), Chippendale

Une règle divisée de 1 m en acier au nickel, appartenant au N.S.L., a été mesurée au N.R.C. (Ottawa) en

1964 par des membres du N.S.L. et du N.R.C. travaillant ensemble. Une règle de 1 m du N.R.C. est en cours de mesure au N.S.L. par des membres des deux laboratoires.

Le Mètre N° 20 en platine iridié, appartenant à l'Australie, a été mesuré au B.I.P.M. en décembre 1969 et sera remesuré au N.S.L. ⁽¹⁶⁾.

Les résultats actuels montrent un accord de 1×10^{-7} , mais les différences entre laboratoires dépassent les erreurs estimées sur les mesures.

Il nous semble qu'une règle à traits convient mieux qu'un étalon à bouts pour une comparaison internationale. En effet, la mesure d'un étalon à bouts fait intervenir en général des facteurs tels que l'incertitude due aux contacts par adhérence, les défauts de planéité, les pertes de phase sur les faces réfléchissantes, qui tendent à rendre les résultats moins concluants. Aucun de ces effets n'apparaît dans la détermination d'un intervalle entre deux traits d'une règle ; ce qui est important c'est l'identité des deux traits quant à leur profondeur, leur largeur, leur forme et leur symétrie, de sorte que le microscope photo-électrique, ou n'importe quel microscope, "voit" les deux traits exactement de la même façon. Cette condition est probablement le mieux satisfaite avec les graduations formées de couches minces déposées sous vide donnant aux traits une forme "en créneau". Une échelle en silice fondue portant une graduation de ce type est utilisée dans notre interféromètre de Perot-Fabry à balayage.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (P.T.B.), Braunschweig

Un calibre industriel de 1 m à bouts plans et parallèles a été mesuré au B.I.P.M. et à la P.T.B. en 1967 ; l'écart entre les deux laboratoires est de $0,01 \mu\text{m}$, soit un accord de 1×10^{-8} .

La P.T.B. serait prête à participer à une comparaison internationale. Le type d'étalon le plus convenable

⁽¹⁶⁾ Voir ci-après à B.I.P.M. et Procès-Verbaux C.I.P.M., 38, 1970, p. 39.

serait un calibre à bouts plans et parallèles. Ces comparaisons internationales ne paraissent cependant pas nécessaires. Il est généralement admis que l'exactitude avec laquelle on sait reproduire le mètre dans sa définition actuelle est de l'ordre de 1×10^{-8} ou mieux. Si l'on trouvait des différences notablement supérieures entre laboratoires, cela pourrait être attribué seulement à des imperfections des étalons utilisés ou à des erreurs faciles à éviter.

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES (B.I.P.M.), Sèvres

a) Mesure d'un calibre en acier de 1 m au B.I.P.M. et à la P.T.B. (voir ci-dessus à P.T.B.).

b) Mesure du Mètre prototype N° 20 de l'Australie au N.S.L. et au B.I.P.M. Cet étalon possède plusieurs traits définissant :

- 1 mètre à 0 °C (intervalle AB')
- 1 mètre à 20 °C (intervalle AB)
- 1 yard (0,914 4 m) à 20 °C (intervalle CD) ;

il possède en outre un trait central M définissant à 20 °C deux longueurs de 0,5 m (AM et MB) et deux longueurs de 0,5 yard (CM et MD).

Les résultats à 20 °C obtenus dans les deux laboratoires sont les suivants (unité : μm) :

| | N.S.L. | | B.I.P.M. | NSL(1967) | NSL(1970) |
|------------------|--------|--------|---------------------|-----------|-----------|
| | (1967) | (1970) | (1969) | - BIPM | - BIPM |
| AM = 0,5 m | + 0,80 | + 0,90 | + 0,87 ₈ | - 0,08 | + 0,02 |
| MB = 0,5 m | + 0,76 | + 0,62 | + 0,67 ₇ | + 0,08 | - 0,06 |
| AM+MB = 1 m | + 1,56 | + 1,52 | + 1,55 ₅ | 0 | - 0,04 |
| <u>AB</u> = 1 m | + 1,49 | + 1,51 | + 1,55 ₅ | - 0,07 | - 0,05 |
| CM = 0,5 yd | + 0,84 | + 0,80 | + 0,80 ₉ | + 0,03 | - 0,01 |
| MD = 0,5 yd | - 0,11 | - 0,19 | - 0,22 ₅ | + 0,11 | + 0,03 |
| CM+MD = 1 yd | + 0,73 | + 0,61 | + 0,58 ₄ | + 0,15 | + 0,03 |
| <u>CD</u> = 1 yd | + 0,68 | + 0,60 | + 0,58 ₄ | + 0,10 | + 0,02 |

A notre avis, il serait très intéressant de faire des mesures comparatives sur des étalons à traits et des calibres de 1 m. Il faudrait que ces étalons soient d'excellente qualité. On devra porter une attention particulière aux inconvénients propres à ces deux types d'étalons : pour les règles, les traits sont "vus" différemment par des microscopes différents ; pour les calibres, la mise en adhérence sur un plan introduit une erreur difficile à évaluer.

AUTRES LABORATOIRES

Le Conseil National de Recherches, Ottawa, a fait des comparaisons sur des étalons à traits du Canada, de la Grande-Bretagne, des États-Unis et de l'Australie⁽¹⁷⁾. Il est prêt à participer à une comparaison internationale.

National Bureau of Standards, Washington : voir Annexes M6 et M7.

Le National Research Laboratory of Metrology, Tokyo, n'a participé à aucune comparaison internationale d'étalons de longueur depuis 1954. Il considère toutefois que des comparaisons internationales d'un étalon à traits de 1 m et de plusieurs étalons à bouts jusqu'à 1 m devraient être effectuées, et se déclare prêt à y participer.

(17) Can. J. Phys., 39, 1961, pp. 781-787 ; Metrologia, 4, 1968, pp. 154-161.

Quelles sont les perspectives d'un nouveau changement de la définition du mètre ?

Certains soutiennent que la vitesse de la lumière (ou des ondes électromagnétiques) dans le vide sera mesurée dans un avenir assez proche avec une précision bien meilleure qu'elle ne l'a été jusqu'à présent, et qu'alors il deviendra souhaitable de définir l'unité de longueur par la longueur de parcours de la lumière dans le vide pendant une durée fixée par convention, après avoir fixé aussi par convention la valeur obtenue de la vitesse de la lumière. Que pensez-vous de cette suggestion ?

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (N.P.L.), Teddington

Il n'y a aucun doute que la définition du mètre de 1960 fut bien fondée. L'emploi de la longueur d'onde d'une raie spectrale a rendu l'étalon primaire plus accessible et a grandement amélioré l'exactitude pratique des mesures de longueur. Les comparaisons de lampes spectrales entre les laboratoires ont confirmé que la longueur d'onde correspondant à l'étalon primaire est reproduite dans les divers laboratoires avec une incertitude qui n'excède pas 1×10^{-8} , c'est-à-dire avec la précision admise pour la lampe à krypton 86.

En métrologie industrielle, pour les mesures de calibres et d'échelles de précision, l'exactitude offerte par l'étalon du krypton dépasse les exigences pratiques. En effet, les problèmes de dilatation thermique et de définition d'une longueur mécanique soit par des traits, soit par des surfaces planes parallèles, font que l'obtention d'une telle exactitude reste un difficile problème de laboratoire. On constate ainsi que l'exactitude de l'étalon actuel est suffisante pour tous les besoins pratiques et qu'il y a peu de raisons de changer la définition. On peut certainement dire qu'il n'y a pas urgence pour une nouvelle redéfinition. Il existe pourtant certaines applications scientifiques, telles que des observations de contraintes en géophysique, pour lesquelles une source ayant une longueur d'onde plus repro-

ductible est désirable. Néanmoins ces applications n'exigent une bonne reproductibilité que pour détecter de petites variations de distance ; il n'est pas nécessaire de connaître la longueur d'onde en valeur absolue.

Les lasers émettant sur un seul mode constituent des sources qui ont de nombreux avantages pratiques pour les mesures interférentielles. La grande intensité de telles sources et la facilité avec laquelle elles peuvent être utilisées dans des interféromètres à grandes différences de marche font que leur utilisation constante en métrologie pratique semble assurée. Il apparaît aussi que les lasers peuvent être asservis de façon à fournir une longueur d'onde plus reproductible que l'étalon actuel. Dans ces circonstances il serait plus avantageux de redéfinir le mètre à partir d'une telle longueur d'onde. Cependant, les lasers sont encore relativement mal connus et il est impossible de dire quelle est la transition laser qui offrira le plus grand avantage pratique. Nous considérons en effet que les avantages dans la mise en pratique d'un étalon de longueur sont plus importants que la reproductibilité, pourvu qu'elle ne soit pas inférieure à celle de l'étalon actuel.

La possibilité d'un changement de la définition de l'unité de longueur par l'adoption d'une nouvelle définition fondée sur la vitesse de la lumière demande un examen très attentif. Cela représenterait un changement de point de vue aussi fondamental que lors du remplacement d'une barre de métal par une longueur d'onde étalon. Pour autant que cela constituerait un progrès vers la rationalisation de l'actuel système d'unités de base, il semble que ce serait une étape souhaitable. Il est cependant important de garder présent à l'esprit que l'essence d'une unité fondamentale n'est pas sa définition formelle, mais la facilité de sa réalisation pratique et de son application. Une définition du mètre à partir de la vitesse de la lumière ne pourra être défendable que lorsqu'il deviendra évident que sa mise en pratique ne diminuera en aucune façon l'accessibilité ni la commodité d'emploi de l'étalon, ni l'exactitude dans les mesures de longueurs en laboratoire. Quoiqu'une telle redéfinition du mètre doive être considérée comme une éventualité, il nous

semble prématuré, actuellement, de prendre une décision à ce sujet, la viabilité de la proposition dépendant des progrès futurs.

NATIONAL STANDARDS LABORATORY (N.S.L.), Chippendale

Avant de prendre vraiment en considérations les propositions pour une nouvelle définition du mètre fondée sur l'étalon de temps et sur une valeur de la vitesse de la lumière "c" fixée par convention, deux faits expérimentaux devraient être établis. Premièrement, que "c" est mesurable et reproductible avec au moins la même précision que l'étalon actuel de longueur (1×10^{-8}). Deuxièmement, que les fréquences optiques sont mesurables au moins avec la même précision relative, et de préférence avec la précision de l'étalon de temps (1×10^{-11} à 1×10^{-12}). Le premier fait reste encore à démontrer et le second n'est pas encore accessible.

Des expériences en cours, ou proposées, pour la détermination de "c" à 1×10^{-8} en mesurant simultanément des différences de fréquences et de longueurs d'onde exigent la détermination d'ordres d'interférence, par voie optique, sur des distances de 1,5 à 300 m avec des précisions de l'ordre de 1×10^{-11} à 1×10^{-14} , pour des fréquences de battements de 1 THz à 0,5 GHz. Si cela est faisable, cela implique alors que les comparaisons de longueurs d'onde optiques, au moins pour deux radiations voisines, peuvent être faites avec cette même précision.

En admettant que "c" et les fréquences optiques soient mesurables avec les précisions mentionnées ci-dessus pour justifier une prise en considération d'une nouvelle définition du mètre, les avantages réels d'un tel changement restent douteux. Les mesures de longueur effectuées dans les laboratoires de métrologie ou dans l'industrie, qui sont si importantes pour l'intérêt général, continueraient à être faites au moyen d'une longueur d'onde étalon. Il est facile, par exemple, de mesurer par interférométrie un étalon de 25 mm avec une précision de 1×10^{-6} , mais il est difficile d'envisager de mesurer l'intervalle de temps à mieux que 1 fs.

Il existe un réel espoir d'un nouvel étalon de longueur d'onde fourni par un laser asservi sur une raie naturelle d'absorption saturée dans la région visible du spectre, dont la reproductibilité soit du même ordre que celle de l'étalon de temps (1×10^{-11}). Quel serait le mérite d'une nouvelle définition du mètre qui ferait intervenir une constante physique dont la mesure à 1×10^{-8} est un travail énorme qui n'a pas encore été mené à bien ?

Les très grandes distances, telles que celles qui intéressent la géodésie, la navigation et l'espace, sont mesurées très commodément en fonction de "c" et de l'étalon de temps, mais cet argument seul justifie difficilement une nouvelle définition du mètre.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (P.T.B.), Braunschweig

Une nouvelle définition du mètre ne semble pas urgente. Il paraît très vraisemblable que, tôt ou tard, le mètre sera défini au moyen d'une radiation laser, jouant le rôle d'intermédiaire. Comme les progrès sur les lasers se développent rapidement, il serait imprudent de prendre une décision hâtive.

Une unité de longueur reliée à la vitesse de la lumière serait particulièrement commode en astronomie et en géodésie. Toutefois, le nombre de mesures de longueur dont on a besoin dans ces disciplines est pratiquement négligeable par rapport à celui que nécessitent les autres domaines des sciences et de l'industrie. Dans la grande majorité des cas, les longueurs à mesurer, dans ces dernières applications, sont de l'ordre de 1 m ou moins. L'unité de longueur, pour être pratique, doit être compatible avec cet ordre de grandeur le plus fréquent. Les longueurs de l'ordre du mètre peuvent facilement être mesurées à l'aide d'une longueur d'onde. Mais, pour le moment, il serait très peu pratique de mesurer des longueurs de cet ordre en année de lumière. Sans aucun doute, la longueur d'onde restera encore longtemps en usage comme unité pratique. Ainsi, en reliant l'unité de longueur à l'unité de temps par l'intermédiaire de la vitesse de la lumière, on créerait une définition ressemblant à un serpent qui se mord la queue.

AUTRES LABORATOIRES

Le Conseil National de Recherches, Ottawa, estime que les lasers asservis sur des raies d'absorption semblent les plus prometteurs pour une amélioration de l'étalon primaire de longueur. Pour le moment, il apparaît prématuré de considérer l'emploi de "c" pour définir l'étalon primaire de longueur.

National Bureau of Standards, Washington : voir Annexes M 6, M 8, M 9 et M 10.

Le National Research Laboratory of Metrology, Tokyo, est intéressé par le problème de la définition de l'unité de longueur par l'intermédiaire de l'unité de temps et de la vitesse de la lumière ; des études sont en cours à ce sujet (voir Annexe M 3).

ANNEXE M 3

Commentaires sur les perspectives d'une nouvelle définition du mètre

Par K. SHIMODA

Département de Physique, Université de Tokyo

A la suite des récents progrès sur la stabilisation et la mesure absolue de la fréquence des lasers, nous pensons que les lasers asservis sur des transitions moléculaires dépasseront ou tout au moins atteindront bientôt la stabilité et la précision des étalons de fréquence à césium et à hydrogène.

En principe, on peut fixer par définition aussi bien la longueur d'onde d'une transition stable et reproductible que la vitesse de la lumière. La longueur d'onde de la raie $F_1^{(2)}$ de la branche P(7) de la bande de vibration ν_3 du méthane ($\lambda = 3,39 \mu\text{m}$) semble posséder les qualités d'un bon étalon de longueur [1, 2].

Naturellement, la décision dépendra des progrès futurs des mesures interférentielles dans les régions visible et infrarouge et du développement des techniques de stabilisation des lasers.

Si les techniques de mesure des fréquences reliant le domaine des micro-ondes au domaine visible du spectre en passant par l'infrarouge se développent rapidement, de telle sorte que les mesures de fréquence fondées sur un étalon de temps deviennent aussi faciles que les mesures

actuelles de fréquence des micro-ondes, il sera alors plus commode de définir la vitesse de la lumière que la longueur d'onde d'une transition particulière. L'étalon de temps pourrait être fourni soit par une transition micro-onde (par exemple Cs ou H), soit par une transition optique (par exemple CH_4). Disposant d'un "compteur de fréquences optiques" on pourra employer n'importe quel type de laser relativement stable pour les mesures précises de longueur. On pourra même utiliser un laser stable et ajustable pour la métrologie. Le laser sera ajusté de façon que la longueur d'onde soit égale à un sous-multiple entier de la longueur à mesurer ; la fréquence du laser ajusté permettra alors de connaître la valeur précise de la longueur si la vitesse de la lumière est connue par définition.

Si, par contre, la technologie de la mesure des fréquences optiques reste dans un état tel qu'il soit nécessaire de mettre en oeuvre un appareillage coûteux et compliqué et des procédés particulièrement élaborés, il sera alors plus approprié de définir la longueur d'onde d'une transition particulière. Dans l'état actuel de la technologie et de la spectroscopie des lasers, la radiation paraissant la mieux qualifiée pour être proposée comme étalon primaire de longueur est la radiation $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ du méthane, tandis que plusieurs autres radiations telles que celles de l'iode à $\lambda = 0,633 \mu\text{m}$, celles de l'ammoniaque, des halogénures de méthyle et d'autres dans la région des $10 \mu\text{m}$ pourraient être utilisées comme étalons secondaires.

Lorsque la fréquence des lasers sera stabilisée et mesurée avec une précision meilleure que 1×10^{-12} , la définition du mètre devra tenir compte des effets de relativité.

Le C.C.D.M. devrait collaborer avec le C.C.D.S. en ce qui concerne cet aspect de la question. A mon avis, on doit laisser constante la valeur de la vitesse de la lumière même si d'autres soit-disant constantes telles que h , e , etc. sont affectées par de petites variations relativistes. Cela n'implique pas nécessairement que la vitesse de la lumière doit être fixée par définition plutôt que la longueur d'onde d'une transition.

Les effets relativistes à considérer sont assez bien connus ; ce sont : l'effet de recul du photon absorbé ou émis, l'effet Doppler transversal dû aux vitesses moléculaires et les déplacements vers le rouge dus au potentiel gravitationnel et à l'accélération.

Les mesures précises de la vitesse de la lumière fondées sur les étalons actuels de longueur et de temps devraient être poursuivies avec toutes les possibilités de la métrologie, et les recherches sur la stabilisation et la mesure des fréquences des lasers devraient être encouragées pour atteindre la plus haute précision.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] SHIMODA (K.), Absolute frequency stabilization of the $3.39 \mu\text{m}$ laser on a CH_4 line, IEEE Trans., IM-17, 1968, p. 343.
- [2] UEHARA (K.), SAKURAI (K.) and SHIMODA (K.), Stark effect of the absorption line of methane observed by $3.39 \mu\text{m}$ He-Ne maser, J. Phys. Soc. Japan, 26, 1969, p. 1018.
-

ANNEXE M 4

Méthode pour stabiliser la fréquence d'un laser He-Ne non modulé

Par K. TANAKA et T. SAKURAI

National Research Laboratory of Metrology (Japon)

En vue de l'utilisation pratique dans les techniques d'interférométrie par laser, nous avons étudié une nouvelle méthode simple pour stabiliser la fréquence d'un laser monomode He-Ne ($0,6328 \mu\text{m}$). Comme le laser asservi par cette méthode n'est pas modulé [1], les franges d'interférence observées sont stables ; on évite ainsi les difficultés d'observation et de détection des franges dans un interféromètre, surtout aux grandes différences de marche, lorsque le laser est asservi avec modulation de fréquence. La nouvelle méthode peut être aussi utilisée pour asservir un laser à plusieurs modes longitudinaux.

La figure 1 présente le schéma de principe du système. Le faisceau d'un laser He-Ne en silice fondue de 15 cm de long, de structure massive, est collimaté et dirigé sur un "oeil-de-chat" ; dans celui-ci, un petit miroir plan est placé dans le plan focal de la lentille et fixé à l'extrémité d'un vibreur en ferrite d'environ 4,5 cm de long. Ce miroir est mis en vibration à la fréquence de résonance (50 kHz) et module la fréquence du faisceau laser, qui est réfléchi deux fois sur le miroir, avec une excursion de fréquence de 400 kHz environ. Le faisceau est ensuite introduit dans un étalon Perot-Fabry en silice fondue, d'une

largeur de bande passante à mi-hauteur d'environ 40 MHz. Cet étalon constitue une enceinte étanche et la fréquence centrale de la bande passante est ajustée par réglage de la pression de l'air avant scellement. La température de

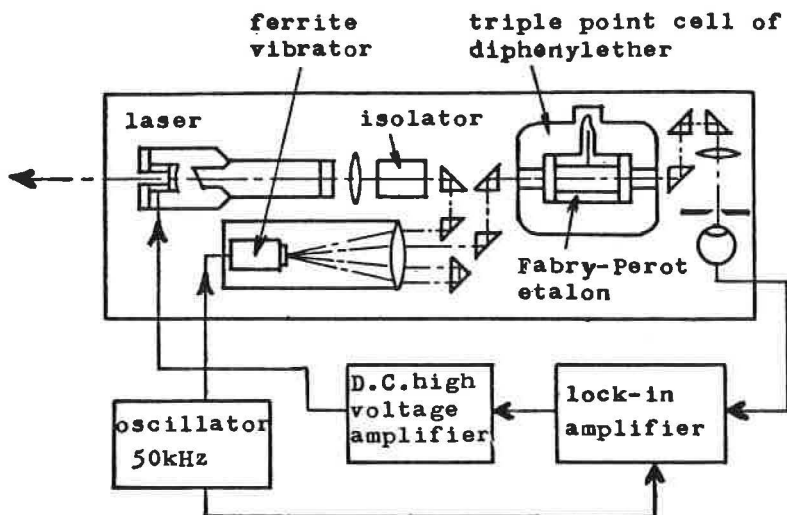


Fig. 1

l'étalon est stabilisée à 26,87 °C en le maintenant dans une cellule au point triple de l'éther phénylique. Le faisceau transmis traverse un petit trou situé au centre des franges du Perot-Fabry et il est détecté par un photomultiplicateur. Le signal d'erreur est ensuite utilisé pour stabiliser la fréquence du laser au centre de la bande passante de l'étalon.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] WILSON (D.C.) and ROWLEY (W.R.C.), J. Sci. Instrum., 43, 1966, p. 314.
- [2] ROWLEY (W.R.C.) and WILSON (D.C.), Nature, 200, 1963, p. 745.
- [3] BERGER (J.) and LOVBERG (R.H.), Rev. Sci. Instrum., 40, 1969, pp. 1569-1574.

**Stabilisation
de la fréquence du laser $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$
sur une raie du CH_4**

Par T. TAKO, M. OHI, Y. AKIMOTO, A. SUGIYAMA
National Research Laboratory of Metrology (Japon)

et K. SHIMODA

Département de Physique, Université de Tokyo

I. INTRODUCTION

Plusieurs méthodes utilisant des raies d'absorption moléculaire ont été proposées pour atteindre un haut degré de stabilité de la fréquence d'oscillation d'un laser [1, 2, 3]. De plus, il a été suggéré que ces raies pourraient être utilisées comme étalons secondaires de longueur d'onde. Cet article décrit la construction d'un étalon de fréquence infrarouge, fondé sur la méthode proposée par Shimoda [1], qui utilise l'absorption du méthane, dans une cellule externe, pour stabiliser le laser $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ et les résultats obtenus dans les expériences préliminaires.

La particularité de cette méthode est que la cellule à absorption est placée à l'extérieur de la cavité, ce qui évite de la soumettre à un champ lumineux intense. La raie d'absorption est élargie par effet Doppler et est moins fine que le Lamb-dip inverse obtenu avec une cellule placée à l'intérieur de la cavité [2]. Cependant, la cellule peut être maintenue en bon équilibre thermique au point triple de l'azote. A cette température la pression de vapeur du méthane reste égale à $45 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ et les impuretés peuvent être maintenues à un taux très faible.

La fréquence de la raie d'absorption du méthane attribuée à la composante $F_1^{(2)}$ de la raie P(7) dans la bande ν_3 est très voisine de la fréquence centrale du laser He- ^{22}Ne ($\lambda = 3,39 \mu\text{m}$) ainsi qu'on le voit sur la figure 1. La différence est seulement de 20 MHz environ. Ainsi, l'oscillation laser d'une raie élargie par effet Zeeman peut aisément être accordée sur le centre de la raie du méthane.

II. DESCRIPTION DE L'APPAREIL

La figure 2 montre le schéma de principe de l'ensemble du dispositif. Un laser est placé dans un champ magnétique qui peut atteindre 5 600 A/m (70 Oe). Un des miroirs du laser est déplacé par un transducteur piézoélectrique pour donner une modulation entre 200 et 1000 Hz de la fréquence. La cavité est définie par trois tiges en silice fondue d'environ 33 cm de long ; les deux extrémités sont collées à l'intérieur de courts cylindres d'invar supportés par des plaques en acier inoxydable. Le tube laser, d'une longueur de 30 cm, a une cathode creuse en aluminium ; il est excité en courant continu. La partie active de la décharge est obtenue dans le capillaire qui a 20 cm de long et 3 mm de diamètre intérieur. Le laser est rempli avec les isotopes ^3He et ^{22}Ne sous la pression totale de $270 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ (2 Torr). La puissance peut atteindre 2 mW. Un diaphragme de 1 à 1,5 mm de diamètre est introduit dans la cavité pour supprimer les modes d'oscillation obliques.

Une partie de la puissance du laser est envoyée sur un détecteur par une lame séparatrice pour asservir le courant dans les solénoïdes et obtenir un sommet plat de la courbe du gain au centre de la raie d'absorption. L'autre partie du faisceau traverse la cellule de méthane d'environ 20 cm de longueur et tombe sur un détecteur au Ge-Au monté à l'extrémité inférieure de la cellule qui est maintenue à la température de l'azote liquide ou au point triple de l'azote. Le circuit de contre-réaction est constitué d'un amplificateur d'asservissement suivi d'un amplificateur à courant continu. Le signal est envoyé au transducteur piézoélectrique qui déplace le miroir du laser.

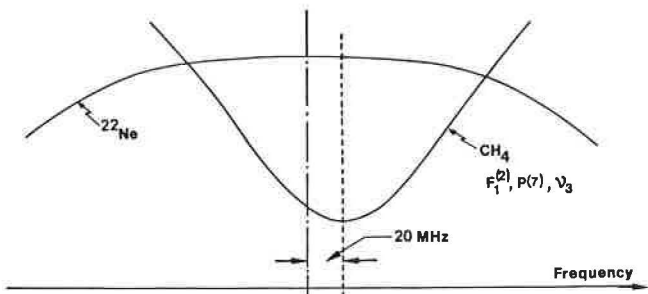


Fig. 1.- Courbe de gain du laser, élargie par effet Zeeman, et raie d'absorption du méthane.

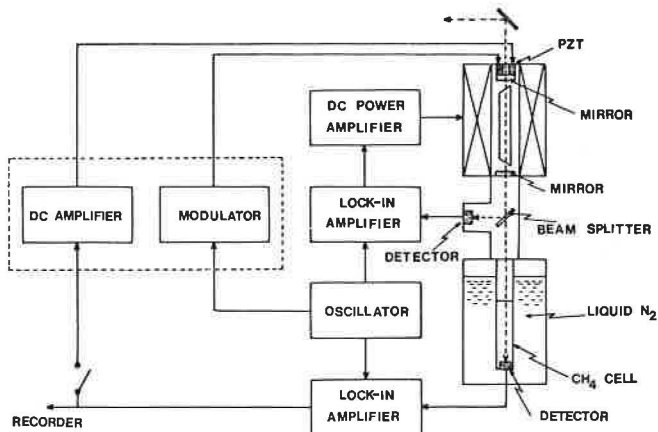


Fig. 2.- Schéma du système de stabilisation de la fréquence du laser sur la raie d'absorption du méthane.

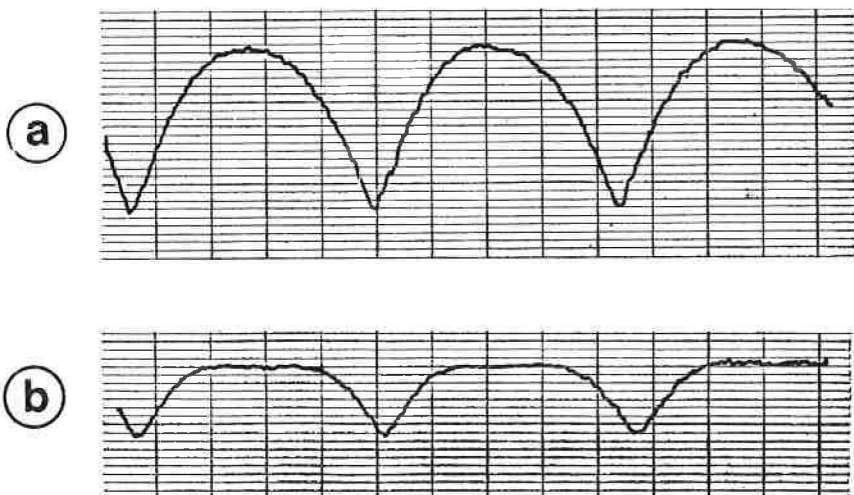


Fig. 3.- Puissance de sortie du laser en fonction de l'accord de la cavité.

- a) sans champ magnétique ;
- b) avec champ magnétique de 3 200 A/m.

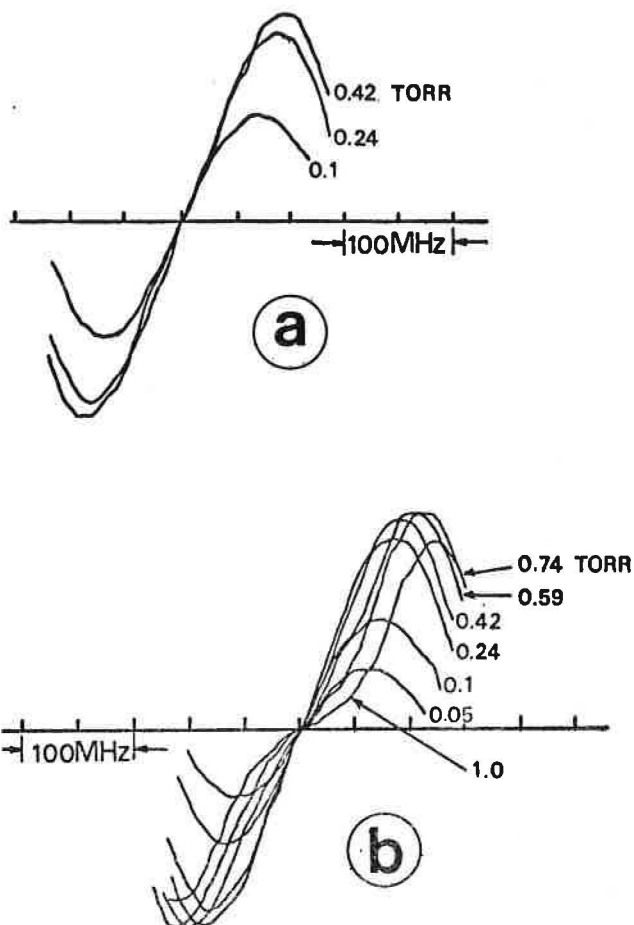


Fig. 4.- Dérivée première par rapport à la fréquence de la puissance de sortie du laser après passage dans la cellule à absorption.

Les courbes de la figure (b) pour les pressions de 0,1, 0,24 et 0,42 torr sont reproduites en (a).

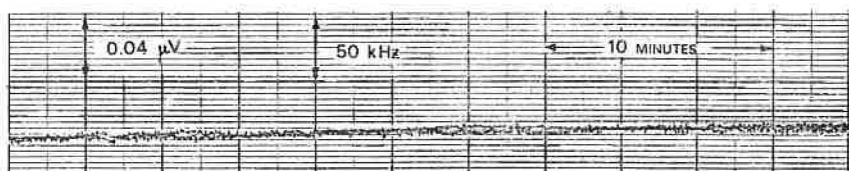


Fig. 5.- Enregistrement de la tension de sortie de l'amplificateur d'asservissement avec la boucle de contre-réaction fermée.

Dérive de la fréquence : 0,25 kHz/min.

III. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

La figure 3 représente la puissance du laser en fonction de l'accord de la cavité quand l'intensité du courant dans la décharge est 4 mA, avec un diaphragme de 1,5 mm de diamètre placé dans la cavité. L'enregistrement (a) correspond au fonctionnement normal ; l'enregistrement (b) correspond au fonctionnement avec élargissement par effet Zeeman dans un champ d'environ 3 200 A/m (40 Oe).

La dérivée première par rapport à la fréquence de la puissance de sortie du laser après passage dans la cellule à absorption est présentée à la figure 4 pour plusieurs pressions du méthane. La fréquence du laser est modulée à 500 Hz avec une excursion de fréquence de crête à crête de 14 MHz. Comme on le voit sur la figure 4a, les pentes des courbes pour des pressions du méthane de 13, 32 et 56 N·m⁻² (0,1, 0,24 et 0,42 mmHg) sont pratiquement identiques autour du centre de la raie. Il est à remarquer que le signal d'asservissement n'est pas sensible à la pression du méthane dans ce domaine.

La tension de sortie de l'amplificateur d'asservissement, avec la boucle de contre-réaction fermée, est enregistrée en fonction du temps (Fig. 5). Le gain en boucle ouverte est environ 560. L'étalonnage en fréquence est obtenu près du centre de la raie à partir de la courbe de la figure 4. La dérive relative de fréquence est estimée à 8×10^{-11} par heure.

En conclusion, on peut atteindre la reproductibilité de la fréquence de quelques 10^{-11} que l'on escomptait. D'autres études par mesures de battements entre deux lasers stabilisés indépendamment, ainsi que quelques améliorations, sont en cours pour obtenir une meilleure stabilité.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] SHIMODA (K.), IEEE Trans., IM-17, 1968, p. 343.
- [2] BARGER (R.L.) and HALL (J.L.), Phys. Rev. Lett. 22, 1969, p. 4.
- [3] HANNES (G.R.) and BAIRD (K.M.), Metrologia, 5, 1969, p. 32 et Appl. Phys. Lett., 14, 1969, p. 362.

ANNEXE M 6

**Commentaires du N.B.S.
pour la 4^e session du C.C.D.M.**

Commentaires rassemblés par E. AMBLER et K. G. KESSLER

Nos commentaires concernent quatre domaines principaux ; nous désirons en outre faire une proposition sur un point particulier : l'adoption d'un étalon provisoire de longueur d'onde pour les mesures nécessitant une précision qui dépasse les possibilités de la radiation étalon primaire du krypton 86 (voir ci-après 2.a). De plus amples détails sont donnés dans les Annexes M 7 à M 11, M 13 et M 14.

1. Nous présentons les résultats de comparaisons de lasers He-Ne asservis sur le Lamb-dip, entre eux et avec des lampes à krypton 86 ; ce travail a été fait en coopération par le N.B.S., le N.P.L. et la P.T.B. L'emploi de tels lasers, convenablement construits, assure une exactitude de 1×10^{-7} sur la longueur d'onde (Appl. Opt., 7, N° 2, 1968, p. 289).

2.a) Les résultats des expériences sur l'asservissement de lasers par la puissante technique de l'absorption moléculaire saturée sont décrits. Une stabilité de 1×10^{-11} est régulièrement obtenue, mais il est nettement évident qu'une stabilité encore bien meilleure peut être atteinte. De nombreuses combinaisons de longueurs d'onde laser et de

transitions moléculaires ont été étudiées, mais la combinaison de la raie $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ du laser He-Ne et de la raie P(7) de la bande ν_3 du méthane a été choisie pour une étude approfondie comme étant, à notre avis, le système qui promet la plus haute précision.

b) La longueur d'onde du laser asservi cité ci-dessus a été mesurée par rapport à celle de la radiation étalon primaire du krypton 86. La précision qui peut être obtenue est évidemment limitée par les caractéristiques de l'actuel étalon de longueur.

c) Considérant l'emploi croissant des lasers et la nécessité dans de nombreuses recherches scientifiques de faire des mesures de longueurs d'onde avec une précision supérieure à celle que peut fournir l'étalon primaire de longueur actuel, nous pensons qu'il est nécessaire d'avoir un nouvel étalon défini avec une meilleure précision. Nous proposons que le laser He-Ne asservi sur une raie d'absorption du méthane soit adopté comme étalon provisoire de longueur d'onde et que sa longueur d'onde soit admise comme étant connue avec 11 chiffres significatifs.

Après son adoption comme étalon provisoire, nous voudrions recommander que cette longueur d'onde soit utilisée comme référence pour l'étalonnage d'autres systèmes utilisant pour leur stabilisation l'absorption moléculaire saturée. L'aboutissement final de ce travail pourrait être un éventuel changement de la définition du mètre.

3. Plusieurs points concernant les comparaisons d'objets matériels de grande longueur, tels que les règles à traits et les calibres à bouts plans, sont examinés (Annexe M 7).

a) Avec quelle précision la longueur d'un objet matériel peut-elle être définie et mesurée de façon absolue ?

b) Est-il souhaitable d'organiser, sous l'égide du B.I.P.M., des comparaisons internationales d'étalons matériels de longueur ?

c) Les calibres actuels sont-ils susceptibles de satisfaire les besoins de la métrologie future, en particulier ceux de l'industrie des machines-outils.

4. Une courte description de plusieurs expériences en cours intéressant le Comité Consultatif est présentée.

a) Expériences en vue de la mesure de la fréquence des radiations visibles (Annexe M 8).

b) Progrès réalisés dans la mesure de la vitesse de la lumière par la technique de modulation en hyperfréquence de la lumière. Cette expérience déterminera aussi la fréquence de la lumière (Annexe M 9).

c) Progrès dans la détermination de la vitesse de la lumière au moyen d'un interféromètre à très grande différence de marche (Annexe M 10).

d) Progrès dans les mesures précises des rapports de longueurs d'onde en utilisant la méthode de la synthèse de longueurs d'onde (Annexe M 11).

Les récents et importants développements expérimentaux dans l'emploi de la technique de l'absorption moléculaire saturée pour stabiliser les longueurs d'onde laser, dans la mise au point des techniques de synthèse de fréquences jusqu'à 28 THz et au-delà (avec l'espoir d'atteindre la région visible), dans les progrès des techniques de synthèse de longueurs d'onde, de l'interférométrie à grande différence de marche et de la mesure de la vitesse de la lumière, toutes ces questions concernent le C.C.D.M. Il a déjà été suggéré que l'on puisse remplacer bientôt les étalons actuels de longueur et de temps par un étalon unique fondé sur une transition atomique et une valeur admise de la vitesse de la lumière. L'emploi d'une constante fondamentale naturelle telle que "c" pour réduire le nombre des unités de base définies indépendamment a certainement un attrait esthétique. Cependant, quelle que soit la décision finale, elle devrait être prise, à notre avis, pour des raisons pratiques. Ce qui importe avant tout c'est la précision absolue de l'étalon proposé et la possibilité de réaliser dans la pratique cette précision. Il nous semble très prématuré d'hasarder un pronostic sur la façon dont les choses se passeront. Ce qui en tout état de cause paraît évident, c'est qu'il y a eu de spectaculaires progrès dans la stabilisation des radiations laser, tant du

point de vue de la largeur de raie (précision) que des déplacements du centre de la raie induits par la pression ou la puissance (exactitude). Ce qui servirait au mieux, à notre avis, d'encouragement à des progrès ultérieurs dans ces voies et dans d'autres, serait l'adoption officieuse d'un étalon provisoire de longueur d'onde de haute précision. Nous suggérons le système asservi sur la raie $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ du méthane.

(25 juin 1970)

ANNEXE M 7

Sur l'emploi d'un étalon de longueur d'onde pour mesurer un objet matériel

Par J. A. SIMPSON

National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique)

L'adoption par la 11^e Conférence Générale des Poids et Mesures en 1960 d'une radiation du krypton 86 comme étalon a permis de définir les longueurs avec une précision d'environ 3×10^{-9} . Dix ans plus tard, avec le développement de sources lasers hautement cohérentes et très lumineuses, les mesures interférométriques devinrent possibles avec cette précision. De récentes améliorations des techniques au N.B.S. [1] et ailleurs [2] ont permis d'atteindre des sensibilités meilleures que 1×10^{-10} . Malheureusement, les métrologistes n'ont pas pleinement démontré la possibilité de transférer cette précision aux mesures d'objets matériels pour l'emploi scientifique ou technique. Jusqu'à ce que cette démonstration puisse être faite, il reste possible qu'une véritable cohérence internationale ne puisse être atteinte si des différences de techniques conduisent à des erreurs systématiques lors du passage de l'étalon de longueur à l'objet matériel à mesurer.

Comme J. Terrien l'écrivait en 1965 [3], la tâche de transférer une longueur d'onde étalon à un objet matériel n'est pas simple : "The accuracy of interferometric measurement of lengths depends upon the accuracy of the

wavelength of the radiation used, which involves much attention to the source of light, and to the refractive index of the medium of propagation. Phase shifts, interference of coherent unwanted light, imperfect flatness of mirrors and unevenness of their illumination are common causes of systematic error". Il est de plus en plus évident que ces facteurs et éventuellement d'autres limitent la cohérence entre les laboratoires au-delà des valeurs souvent admises de 1×10^{-8} sur les étalons à bouts et de $0,01 \mu\text{m}$ sur les règles à traits de 1 mètre.

Les problèmes impliqués dans la mesure des étalons à bouts et des étalons à traits sont différents et doivent être considérés séparément.

Les règles à traits sont maintenant fabriquées sur des machines à diviser commandées par laser avec une exactitude que l'on estime être de l'ordre de $0,02 \mu\text{m}$ (non cumulative). Les traits obtenus par dépôt de métal sous vide sont fins avec des bords parallèles et leur qualité est très supérieure à celle des traits gravés selon l'ancienne technique. Des expériences ont montré qu'ils peuvent être pointés par des microscopes photoélectriques avec une précision meilleure que $0,01 \mu\text{m}$.

Les règles à traits sont maintenant mesurées au moyen de comparateurs interférentiels complexes, et souvent par comptage direct de franges d'un laser asservi. Ces appareils sont coûteux et peu de laboratoires, sinon aucun, en possèdent plus d'un seul de sorte que la recherche approfondie des erreurs instrumentales systématiques ne peut être faite. L'existence de petites erreurs systématiques a été mise en évidence par P. Carré pour l'appareil du B.I.P.M. [4] où il est établi que le déplacement du chariot peut introduire une erreur d'environ $0,03 \mu\text{m}$ et que la différence des lectures de pointés dépendant de la position relative (0-1000 ou 1000-0) de la règle, peut atteindre le même ordre de grandeur.

Le N.B.S. est particulièrement conscient de ces types d'erreurs systématiques étant donné que pour notre appareil [5] qui a une précision d'environ $0,15 \mu\text{m}$ (4σ) pour les mesures faites avec la règle dans une position,

nous avons trouvé des différences dépendant de la position de la règle qui peuvent atteindre $0,6 \mu\text{m}$. La démonstration ayant été faite de la symétrie et de la reproductibilité de cette erreur, nous croyons que la moyenne des mesures faites dans les deux positions de la règle est néanmoins exacte avec la précision indiquée ci-dessus. La cause de cette erreur finalement détectée est subtile. Dans notre appareil la distorsion du banc sous le poids du chariot principal est compensée par un système d'asservissement agissant sur le support de la règle. Ce système est très satisfaisant. Cependant, le microscope et le miroir fixe sont aussi montés sur le banc dont la déformation introduit un déplacement du second ordre de ces éléments, ce qui est la cause d'erreur systématique. Un effet similaire mais beaucoup plus petit ($0,03 \mu\text{m}$) a été décelé par Baird dans l'appareil du N.R.C. [6]. Les montures de ces éléments sont en cours de transformation, ce qui devrait éliminer ces difficultés. Le fait qu'une telle erreur systématique relativement importante nous soit restée longtemps ignorée, nous laisse craindre que d'autres causes d'erreurs puissent encore être cachées. Des comparaisons avec d'autres appareils fournissent la plus sûre protection contre ce type d'erreurs subtiles auxquelles sont sujets les équipements complexes.

Les problèmes des étalons à bouts sont plus complexes que ceux des étalons à traits dans la mesure où ils intéressent à la fois les calibres de l'ordre du mètre et les petits calibres de 50 mm et au-dessous.

Le problème de l'indice de réfraction de l'air est le même pour les étalons à bouts et à traits. Bien que l'on estime que la formule d'Edlén, qui relie l'indice de réfraction aux conditions ambiantes, soit exacte à $\pm 5 \times 10^{-8}$, il a été observé des écarts atteignant 22×10^{-8} entre l'indice calculé et l'indice mesuré dans un interféromètre [7]. La cause de ces écarts est, pense-t-on, due à la contamination de l'air par des vapeurs organiques. Manifestement, c'est un problème dont l'étude doit être poursuivie.

Un problème propre aux étalons à bouts est celui de la correction de perte de phase à la réflexion. Ce problème peut être en partie résolu par l'emploi d'étalons à

bouts en quartz, matériau pour lequel la perte de phase est supposée connue. En dépit de cet avantage et du faible coefficient de dilatation du quartz, Väisälä fait état de désaccords, entre laboratoires de métrologie, de $0,27 \mu\text{m}$ pour 1 mètre [8].

En ce qui concerne les petits calibres, le N.B.S. est soumis à une pression croissante de la part de l'industrie de précision qui demande des étalonnages à $\pm 0,0025 \mu\text{m}$; l'évaluation de variations de longueur encore plus petites (d'un ordre de grandeur) fait également l'objet d'une demande importante. Avec l'accroissement des mesures optiques appliquées aux machines-outils commandées par ordinateur et dont la précision est meilleure que 1×10^{-6} , on peut s'attendre à ce que de telles demandes soient de plus en plus fréquentes ainsi que des demandes pour des mesures très précises de longueurs d'onde et des demandes de précision équivalente sur des objets de forme plus compliquée que celle d'un calibre.

Dans la métrologie des calibres la "longueur définie", qui inclut l'épaisseur du film de collage, impose une limite à la précision à l'intérieur de laquelle les comparaisons sont significatives. Depuis des années, les auteurs n'ont pas pu se mettre d'accord sur la valeur de cette limite [9], mais on pense qu'elle est de l'ordre de $0,008 \mu\text{m}$. En outre, les divers laboratoires mesurent la correction due à la perte de phase de différentes manières ; pour les calibres d'acier cette correction est de l'ordre de $0,05 \mu\text{m}$. La dernière comparaison internationale sous les auspices du B.I.P.M. en 1952-1954 a montré des différences entre les laboratoires et le B.I.P.M. atteignant $0,111 \mu\text{m}$; sur les trente-quatre différences indiquées, vingt-deux dépassaient $0,025 \mu\text{m}$. Ces résultats étaient nettement plus dispersés que ceux d'une comparaison de calibres en quartz exécutée quelque temps avant pour laquelle la dispersion moyenne fut de $0,016 \mu\text{m}$ [10]. L'examen de ces deux résultats suggère que la correction de perte de phase peut être la principale cause de désaccord.

Il y a quelques années, le N.B.S. a entrepris en collaboration avec des fabricants de calibres de précision une étude pour améliorer la stabilité à long terme des

calibres [11]. Cette étude a commencé avec des étalons à bouts en acier et les comparaisons de longueur furent faites avec des calibres de référence au moyen de comparateurs mécaniques. Avec du soin, de telles comparaisons pouvaient être faites avec une précision de $\pm 0,005 \mu\text{m}$. Cette étude a été récemment étendue à des étalons non métalliques, les mesures étant faites au moyen des interférences avec une lampe à mercure 198. L'analyse des résultats, encore incomplets, montre qu'en dépit d'un effort considérable, la précision obtenue n'est pas meilleure que $\pm 0,008 \mu\text{m}$. Puisque dans ces mesures la correction due à la perte de phase est petite et supposée constante et que les calibres étaient mis en adhérence une seule fois, cette précision reflète des erreurs d'origine encore inconnue dans la mesure interférentielle. Il semble qu'il y ait une corrélation anormalement élevée entre ces erreurs et les corrections pour les conditions ambiantes, dont la partie principale provient de l'indice de réfraction de l'air.

En résumé, on peut dire, d'après les récentes expériences faites au N.B.S., que nous ne savons pas transférer un étalon de longueur d'onde à un objet matériel à mieux que 1×10^{-6} environ et qu'il existe des différences systématiques entre laboratoires nationaux.

Pour détecter et évaluer de tels effets, s'ils existent, le N.B.S. aimerait suggérer que le C.C.D.M. :

1° recommande au B.I.P.M. d'organiser des échanges, bien préparés du point de vue statistique, d'étalons à traits et d'étalons à bouts, grands et petits ;

2° encourage la mise au point d'étalons matériels de transfert et de techniques pour l'obtention d'une exactitude plus proche de la précision de la définition de l'unité de longueur.

(24 juin 1970)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] DESLATTES (R.D.), Appl. Phys. Letters, 15, 1969, p. 386.
- [2] BCERSCH (H.), EICHLER (E.) and WIESEMANN (W.), Appl. Opt., 9, 1970, p. 645.
- [3] TERRIEN (J.), Metrologia, 1, 1965, p. 15.
- [4] CARRÉ (P.), Metrologia, 2, 1966, p. 23.
- [5] GILLILLAND (K.E.), COCK (H.D.), MIELENZ (K.D.) and STEPHENS (R.B.), Metrologia, 2, 1966, p. 14.
- [6] BAIRD (K.M.), Rev. Sci. Instr., 32, 1960, p. 549.
- [7] TERRIEN (J.), Metrologia, 1, 1965, p. 80.
- [8] VÄISÄLÄ (Y.) and OTERMA (L.), Metrologia, 3, 1967, p. 37.
- [9] Par exemple : THWAITE (E.G.) and LESLIE (R.T.), Brit. J. Appl. Phys., 14, 1963, p. 711.
ROGLT (F.H.) and BARRELL (H.), Proc. Roy. Soc. (London), A 116, 1927, p. 401.
- [10] PETERS (C.G.) and EMERSON (W.B.), J. Res. Nat. Bur. Stand., 44, 1950, p. 469.
- [11] MEYERSON (M.R.), YOUNG (T.R.) and NEY (W.R.), J. Res. Nat. Bur. Stand., 64C, 1960, p. 175.
-

ANNEXE M 8

Progrès en vue de la mesure de la fréquence de radiations visibles

Par K. M. EVENSON, J. S. WELLS et L. M. MATARRESE
National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique)

Depuis la première mesure de la fréquence d'un laser à 0,89 THz au début de 1967, la limite supérieure des fréquences qui ont été mesurées a augmenté rapidement pour atteindre actuellement 55 THz, soit $\lambda = 5 \mu\text{m}$.

Pour mesurer une fréquence laser inconnue ν_x , il faut ajouter les harmoniques (n et m) de deux autres lasers au moins, de fréquences ν_1 et ν_2 , à l'harmonique l d'un klystron pour obtenir une coïncidence de fréquences :

$$\nu_x = n\nu_1 \pm m\nu_2 \pm l\nu_3.$$

Le tableau I résume un certain nombre de mesures de fréquences de lasers faites à ce jour et celle actuellement en cours.

Dans le domaine des fréquences supérieures au térahertz (550 THz correspond à une radiation verte), les lasers sont actuellement les seules sources de rayonnement électromagnétique suffisamment cohérent pour permettre des mesures de précision. Le travail au N.B.S. a été concentré sur les lasers fonctionnant en régime permanent, tandis qu'au M.I.T. sous la direction de A. Javan on, a utilisé

TABLEAU I

| Fréquence ν_x (THz) | Longueur d'onde λ_x (μm) | Puissance disponible (mW) | Type de Laser | Laser | | Laser | | Klystron | | Réf. |
|-------------------------------|--|---------------------------------|---------------------|-------|------------------|-------|------------------|----------|------------------|----------|
| | | | | n | ν_1 (THz) | m | ν_2 (THz) | l | ν_3 (THz) | |
| 0,010 6* | | 200 | | | | | | | | |
| 0,074 2 | | 100 | | | | | | 7 | 0,010 6 | |
| 0,890 760 6 | 337 | 100 | HCN | | | | | 12 | 0,074 2 | 1,2 |
| 0,804 75 | 373 | | HCN | 1 | 0,891 | | | 3 | 0,029 | 1,2 |
| 3,821 775 | 78 | 20 | H ₂ O | 6 | 0,891 | - 2 | 0,805 | 3 | 0,029 | 2 |
| 10,718 073 | 28 | 350 | H ₂ O | 12 | 0,891 | | | 1 | 0,029 | 2 |
| 28,359 800 | 10,6 | 2 000 | CO ₂ | 3 | 10,718 | - 1 | 3,821 | 1 | 0,027 | 3 |
| 28,306 251 | 10,6 | 2 000 | CO ₂ | 3 | 10,718 | - 1 | 3,821 | 1 | 0,026 | 3 |
| 32,176 084 | 9,3 | Pulsée | CO ₂ | 3 | 10,718 | | | 1 | 0,022 | 4 |
| 32,134 269 | 9,3 | " | CO ₂ | 3 | 10,718 | | | - 1 | 0,020 | 4 |
| 56 | 5 | " | CO | 2 | 26 | | | | | 5 |
| 88,376 37** | 3,39 | 50 | He-Ne | 8 | 10,718 | 3 | 0,891 | - 1 | 0,040 | en cours |

* Bande X du klystron ; mesuré par comptage.

** Par mesures de longueur d'onde.

principalement des lasers pulsés. Pour obtenir une puissance suffisante avec les lasers HCN et H₂O, des lasers spéciaux "Michelson" (à trois miroirs avec sortie par la séparatrice) ont été mis au point.

Nous avons utilisé, jusqu'à environ 2 THz, les classiques diodes "à moustaches de chat" ("catwhisker") en tungstène sur silicium ; pour les fréquences plus élevées on a utilisé le tungstène sur nickel (ce type de diode fonctionne bien aussi à des fréquences plus basses). Un meilleur couplage avec la "moustache de chat", résultant de l'application de la théorie des antennes longues, a facilité les mesures ; cependant, même avec ce couplage amélioré, les lasers H₂O et HCN nécessitent un parcours de 8 m dans le milieu actif pour que la puissance soit suffisante pour produire les harmoniques. Les critères généraux concernant les caractéristiques d'une diode-jonction utilisable comme génératrice et mélangeuse d'harmoniques sont maintenant bien établis. A 28 THz et au-dessus, on a utilisé la production du second harmonique dans des matériaux optiques non linéaires ; il apparaît ainsi nettement que, même si la réponse de la diode est limitée en fréquence, cette autre méthode pourra conduire à des mesures de fréquence dans le visible.

Actuellement, un essai est en cours pour mesurer la fréquence d'un laser He-Ne (dernière ligne du tableau I). Les radiations émises par toutes les diverses sources sont maintenant couplées à la diode "à moustache", et des signaux redressés très acceptables ont été obtenus, ce qui est encourageant pour le succès final de cette mesure. Après que la fréquence du laser non asservi aura été mesurée, un laser asservi sur une raie du méthane lui sera substitué. Une mesure précise de sa fréquence, associée à la mesure de sa longueur d'onde effectuée récemment par R. Barger et J. Hall, fournira une valeur extrêmement précise de la vitesse de la lumière. Les premières mesures de la fréquence devraient être exactes à quelques 10⁻⁹, et des améliorations de la stabilisation de tous les lasers de cette chaîne sont en cours pour permettre des mesures de fréquence encore plus exactes.

(25 juin 1970)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] HOCKER (L.O.) et JAVAN (A.), Phys. Letters, 25A,
1967, p. 489.
- [2] EVENSON (K.M.), WELLS (J.S.), MATARRESE (L.M.) et
ELWELL (L.B.), Appl. Phys. Letters, 16, 1970,
p. 159.
- [3] EVENSON (K.M.), WELLS (J.S.) et MATARRESE (L.M.),
Appl. Phys. Letters, 16, 1970, p. 251.
- [4] DANEU (V.), SOKOLOFF (D.), SANCHEZ (A.) et JAVAN
(A.), Appl. Phys. Letters, 15, 1970, p. 398.
- [5] JAVAN (A.) et al., Communication privée.
-

**Progrès dans la mesure des fréquences optiques
et de la vitesse de la lumière
par la technique de modulation en hyperfréquence
de la lumière laser**

Par Z. BAY et G. LUTHER

National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique)

Résumé. - Exposé d'une expérience, actuellement presque achevée au N.B.S. (Washington), pour mesurer les fréquences optiques et la vitesse de la lumière au moyen d'une technique utilisant une modulation en hyperfréquence d'un faisceau laser. Quelques conséquences relatives à des problèmes métrologiques sont aussi examinées.

Abstract. - Report on an experiment now nearing completion at N.B.S. (Washington) to measure optical frequencies and the speed of light by means of a technique which utilizes a modulation of a laser beam at microwave frequencies. Some implications to problems in metrology are also discussed.

Dans cette expérience, la radiation 632,8 nm d'un laser He-Ne est modulée à 10 GHz par un cristal de KDP placé à l'intérieur de la cavité laser. Le KDP est maintenu dans une section d'un guide d'onde alimenté à 10 GHz. La haute fréquence appliquée au cristal provoque une polarisation elliptique avec une modulation d'amplitude à la fréquence de 10 GHz. Cela produit deux bandes latérales à des fréquences optiques $\nu + \omega$ et $\nu - \omega$, ν étant la fréquence du laser à $\lambda = 632,8$ nm et ω la fréquence de modulation.

Les fréquences des deux bandes latérales auront une composante polarisée à angle droit avec la polarisation

de la radiation originale du laser. Cette composante des bandes latérales est extraite de la cavité laser en la réfractant, au-delà du miroir de la cavité, par traversée d'un cristal de calcite.

Les deux bandes latérales traversent alors un interféromètre Perot-Fabry, puis sont reçues par un détecteur. La longueur ℓ du Perot-Fabry est ajustée de façon que l'interféromètre soit accordé pour chacune de ces bandes latérales. Lorsque cette condition est remplie, on a :

$$\nu + \omega = N_1 \frac{c}{2\ell}, \quad \nu - \omega = N_2 \frac{c}{2\ell}$$

$$\text{et } \nu = \frac{N_2 + N_1}{N_2 - N_1} \omega ,$$

où N_1 et N_2 sont les ordres d'interférence pour les deux bandes latérales dans le Perot-Fabry et c est la vitesse de la lumière. Ainsi donc nous pouvons déterminer la fréquence optique en mesurant une hyperfréquence, qu'on peut directement rattacher à l'étalon de temps, et en déterminant les deux entiers N_1 et N_2 .

La réalisation de la condition d'accord exact est obtenue par deux boucles d'asservissement. La longueur de la cavité Perot-Fabry est modulée à une fréquence voisine de 40 kHz ; on fait varier cette longueur pour diminuer le premier harmonique du signal à 40 kHz. Simultanément, la fréquence ω est modulée à 2 kHz et on fait varier ω pour diminuer le premier harmonique du signal à 2 kHz. Si les deux boucles d'asservissement fonctionnent correctement, le Perot-Fabry sera accordé simultanément pour chacune des deux bandes latérales. La modulation de la fréquence ω est obtenue par modulation de phase de la référence, de sorte que la valeur moyenne de ω est connue avec précision.

L'exactitude avec laquelle cette mesure pourra être faite dépend de deux facteurs : la précision avec laquelle chaque bande latérale satisfait la condition de résonance dans le Perot-Fabry, et l'incertitude de nos corrections de pertes de phase dues à la réflexion sur les miroirs et à la diffraction à l'intérieur du Perot-Fabry.

Des expériences préliminaires ont été exécutées avec une cavité Perot-Fabry de 20 cm ayant une finesse

d'environ 600. Des essais ont montré qu'avec des courants photoélectriques de quelques 10^7 électrons par seconde, et des constantes de temps de l'ordre de la seconde, on pourrait rapidement atteindre une précision de quelques 10^{-8} sur la fréquence ω .

La stabilisation ultérieure de la fréquence laser et l'augmentation de la longueur de la cavité jusqu'à environ 2 mètres devraient permettre une amélioration de la précision jusqu'à 1×10^{-9} environ. Un autre accroissement de la précision d'un facteur 10 peut être escompté de l'augmentation de ω jusqu'à 10^{11} Hz. Il est bien connu que les cristaux de KDP ont des performances aussi bonnes à des fréquences de modulation encore plus élevées. L'augmentation de la constante de temps dans la mesure de ω peut améliorer la précision sur ω au-delà de la limite de 1×10^{-10} .

Les corrections de pertes de phase dues à la réflexion et à la diffraction peuvent être déterminées en faisant des expériences à plusieurs valeurs de l . Une analyse théorique de telles expériences en série montre que l'exactitude de la valeur de ν peut presque atteindre la précision de la détermination de ω .

Pour obtenir la vitesse de la lumière il faut mesurer simultanément la fréquence et la longueur d'onde de la radiation laser. Cela est obtenu en asservissant la fréquence laser ν , avec une différence de fréquence prédéterminée, à un laser He-Ne lui-même asservi. La longueur d'onde de ce dernier peut être déterminée par rapport à la radiation étalon du krypton 86 par des techniques semblables à celles qui sont exposées dans l'Annexe M 11.

Dans les expériences préliminaires actuelles avec la cavité de 20 cm, la fréquence du laser est asservie sur un laser He-Ne lui-même asservi sur le Lamb-dip. Nous espérons obtenir ainsi une mesure de la vitesse de la lumière qui atteindra une exactitude au moins égale à 1×10^{-7} . La poursuite de ces expériences avec des cavités plus longues nous conduira au point où l'exactitude de la détermination de la vitesse de la lumière ne sera plus limitée par l'exactitude de la détermination de ν , mais plutôt par celle de la longueur d'onde étalon du krypton 86.

La technique de la modulation en hyperfréquence de lasers peut aussi être utilisée pour les mesures de longueur. La variation de phase (Φ) due à la diffraction pour les modes de résonance de la cavité dépend seulement de la géométrie de la cavité. Ainsi, les bandes latérales $\nu \pm \omega$ d'un laser modulé en hyperfréquence se propagent avec la même variation de phase due à la diffraction, et la vitesse de phase de l'onde de battement (fréquence 2ω) est égale à c . Cela permet l'établissement d'une échelle linéaire de longueur fondée sur la vitesse de la lumière dans le vide. En accordant la cavité simultanément sur les deux bandes latérales on rend la longueur de la cavité un multiple entier, facilement connu, de la demi-longueur d'onde des battements ($\Lambda = c/2\omega$) ; mais la précision de l'accord de la cavité est donnée par la grande finesse de la cavité pour la longueur d'onde optique. Ainsi, si pour éliminer les effets de pertes de phase à la réflexion on utilise deux longueurs l_1 et l_2 de l'interféromètre, le déplacement du miroir est donné simplement par :

$$l_2 - l_1 = \frac{n_2 \Lambda_2}{2} - \frac{n_1 \Lambda_1}{2} .$$

Il est à noter que cette mesure est indépendante de la connaissance de la longueur d'onde optique et de la courbure des miroirs. Le déplacement du miroir est donc mesuré sur l'échelle linéaire de c , même si des variations séculaires de la longueur d'onde se produisent entre les deux mesures, ou si le faisceau lumineux tombe sur des endroits différents des miroirs qui, par suite d'irrégularités, peuvent présenter des courbures effectives différentes. De telles variations demandent à être soigneusement examinées si la mesure de longueur est basée sur la longueur d'onde optique.

Une application intéressante de cette technique est une mesure directe de la vitesse de la lumière sans aucune référence directe à la longueur d'onde de la lumière laser. La lumière de la lampe à krypton 86 est introduite dans la cavité simultanément avec la lumière du laser. Le déplacement du miroir mobile est mesuré en fonction de la longueur d'onde hyperfréquence $\Lambda = c/2\omega$, où ω est déterminé avec précision, et il est mesuré aussi en mètres au moyen de la longueur d'onde

de la radiation du krypton 86. L'exactitude de c ne sera limitée que par l'incertitude de la longueur d'onde du krypton 86 et sera indépendante de la connaissance de la longueur d'onde du laser.

Nous avons déjà suggéré que la vitesse de la lumière associée avec l'étalon de fréquence pourrait finalement constituer un meilleur étalon de longueur⁽¹⁾. Nous effectuons actuellement une série d'expériences pour démontrer la validité de ce point de vue. Une telle formulation de la définition de l'étalon de longueur présente l'avantage d'un formalisme plus simple. Nous espérons aussi montrer qu'elle offre la précision et l'exactitude requises lorsqu'elle est appliquée aux mesures pratiques.

(25 juin 1970)

(1) BAY (Z.) and LUTHER (G.G.), Appl. Phys. Letters, 13, 1968, pp. 303-4.

ANNEXE M 10

**Rapport sur les progrès de la mesure
de la vitesse de la lumière
par interférométrie à grande différence de marche**

Par J. LEVINE

National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique)

Des progrès importants ont été faits dans le programme de mesure de la vitesse de la lumière.

Pour faire cette mesure nous proposons d'utiliser deux radiations d'un laser He-Ne voisines de $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ (les transitions $3s_2-3p_4$ et $3s_2-3p_2$ du néon). Nous avons construit un laser qui oscille sur les deux longueurs d'onde simultanément et nous avons stabilisé sa cavité en utilisant comme référence un second laser asservi sur une raie d'absorption du méthane. Nous avons détecté les battements à 26 GHz entre les deux radiations au moyen d'une diode rapide à arséniure d'indium polarisée en inverse près du domaine d'avalanche et d'un klystron à 26 GHz. Des mesures sont en cours pour savoir si la fréquence de battement a la stabilité nécessaire pour permettre sa mesure avec la précision de 1×10^{-9} .

La seconde partie de l'expérience consiste en une détermination du rapport des longueurs d'onde des deux radiations. Nous pensons, pour faire cette mesure, utiliser un interféromètre sous vide, de 30 mètres, installé dans une ancienne mine d'or à l'ouest de Boulder (Colorado). Cet interféromètre est actuellement utilisé pour d'autres expé-

riences intéressant la géophysique et l'astrophysique.

Les incertitudes qui apparaissent dans la comparaison interférentielle de deux longueurs d'onde ont été étudiées par R.L. Barger, au Joint Institute for Laboratory Astrophysics, et ses résultats montrent qu'une telle comparaison peut être faite avec une exactitude suffisante pour permettre sur l'ensemble de l'expérience une incertitude globale inférieure à 3×10^{-8} .

Lorsque ces deux mesures sont combinées avec une mesure directe du décalage de fréquence entre la radiation $3s_2-3p_4$ et la radiation du laser asservi sur la raie d'absorption du méthane, on peut en déduire une valeur de la vitesse de la lumière rapportée à la longueur d'onde de cette radiation laser. La mesure de cette longueur d'onde par rapport à celle de l'étalon primaire du krypton 86 est en cours.

(25 juin 1970)

ANNEXE M 11

Techniques de synthèse de longueurs d'onde pour la comparaison des étalons primaire et secondaires de longueur d'onde

Par R. D. DESLATTES, K. D. MIELENZ, W. G. SCHWEITZER et H. P. LAYER
National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique)

I. INTRODUCTION

Les lasers dont la fréquence est stabilisée par référence à une transition d'absorption moléculaire saturée font appel à deux processus de mesure quelque peu différents pour assurer leur utilisation convenable en métrologie fondamentale. En premier lieu, leur stabilité et leur reproductibilité individuelle engagent à entreprendre des comparaisons de longueurs d'onde (ou de fréquences) pour établir un réseau cohérent et très raffiné d'étalons secondaires pour la spectroscopie. A ce jour, l'expérience montre que ces mesures peuvent être faites convenablement avec une précision de 1×10^{-11} ou mieux. Deuxièmement, cette échelle relative très raffinée de longueurs d'onde doit être rattachée à la longueur d'onde étalon primaire du krypton 86 avec la meilleure précision possible correspondant à la définition actuelle. Cette dernière condition s'impose pour l'utilisation en métrologie des nouvelles sources de lumière et en vue de la possibilité, évidente semble-t-il, que si l'on doit redéfinir l'étalon primaire de longueur, l'un des lasers actuels ou futurs, asservi sur une raie d'absorption moléculaire, sera vraisemblablement choisi comme nouvel étalon.

Comme conséquence de cette situation, nous avons installé un appareil assez universel pour la comparaison deux à deux de ces lasers et pour la comparaison de chacun d'eux avec des sources classiques non cohérentes et en particulier avec l'étalon actuel du krypton 86. Pour ce faire, nous avons retenu certains principes dont l'omission a affaibli la valeur de certaines études interférentielles qui n'étaient pas aussi élaborées ; ces principes seront résumés avant la description de l'appareil et de la méthode.

Premièrement, il nous paraît évident qu'on ne devrait pas utiliser en interférométrie de variables d'interpolation (pression, capteur capacitif, ou n'importe quel autre système). Cela signifie que nous ne pouvons faire le rapport de longueurs d'onde nettement différentes que lorsqu'elles sont transmises à leur maximum simultanément par l'interféromètre. Puisque cette condition ne sera presque jamais remplie pour des sources naturelles, il est nécessaire de préparer des sources auxiliaires (oscillateurs locaux avec ou sans bandes latérales) dont le décalage de fréquence par rapport aux sources naturelles intéressantes peut être commodément déterminé. Ces considérations s'appliquent également aux comparaisons de lasers entre eux et à la comparaison de ceux-ci avec la lampe à krypton 86, justifiant ainsi l'emploi du terme "synthèse de longueurs d'onde" pour désigner notre méthode.

Deuxièmement, il y a le problème des pertes de phase à la réflexion qui a été le point noir de l'interférométrie classique ; habituellement, ces pertes de phase ont été étudiées ou corrigées par translation de l'un des deux miroirs pour obtenir les résultats qu'on aurait eus avec une "cavité virtuelle" dont la longueur est la différence entre les deux positions du miroir. Nous avons abordé ce problème d'une façon différente en utilisant deux longueurs pour chaque interféromètre. Notre méthode nécessite des mesures simultanées aux deux longueurs conjuguées avec l'échange possible des deux miroirs.

Enfin, il est bien connu que, même avec de gros efforts dans l'emploi des dispositifs supprimant les faisceaux de retour pour découpler les oscillateurs laser des cavités

résonantes, il subsiste inévitablement un petit résidu d'entraînement de fréquence. La grandeur de cet effet est telle qu'il constitue une perturbation intolérable pour un "étalon", mais qu'il est acceptable pour un oscillateur laser local. Le système de couplage "par battements" utilisé fournit ainsi automatiquement un découplage presque total entre l'étalon et les cavités.

II. DESCRIPTION DE L'APPAREIL

Nous avons d'abord étudié le problème de la comparaison d'un laser asservi sur la raie du méthane ($\lambda = 3,39 \mu\text{m}$) et d'un laser asservi sur la raie de l'iode ($\lambda = 0,633 \mu\text{m}$), et de ces deux lasers avec la radiation étalon du krypton 86 ($\lambda = 0,6 \mu\text{m}$). Un appareil a été construit suivant les principes indiqués ci-dessus et adapté à cette comparaison particulière de trois longueurs d'onde. Le schéma optique de cet appareil est donné à la figure 1 et décrit ci-après.

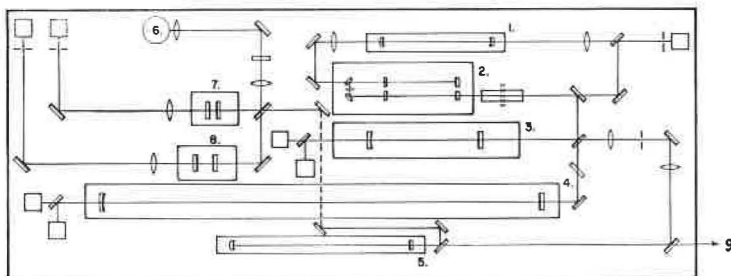


Fig. 1.- Schéma optique pour la comparaison de lasers asservis (au méthane et à l'iode) et de la lampe à krypton 86.

1, Laser asservi sur la raie du méthane ; 2, Oscillateur local infrarouge et laser d'alignement ; 3, Cavité de 62 cm ; 4, Cavité de 2,5 m ; 5, Oscillateur local rouge ; 6, Lampe à Kr 86 ; 7, Étalon de 5 cm ; 8, Étalon de 10 cm ; 9, Vers le laser asservi sur la raie de l'iode.

Puisque le laser asservi sur une raie du méthane est à la fois stable et fidèle, nous l'utilisons comme oscillateur de base pour l'ensemble des opérations. Il sert de référence pour asservir avec décalage de fréquence l'oscillateur local infrarouge ($\lambda = 3,39 \mu\text{m}$) (fig. 1). L'asservissement avec décalage de fréquence fournit une caractéristique d'asservissement commode du type discriminateur dont la précision est de l'ordre de 10^{-10} à 10^{-14} ; il est plus facile à mettre en oeuvre que l'asservissement en phase et réalise un découplage total.

Le faisceau provenant de l'oscillateur local infrarouge est envoyé après adaptation d'étendue ("mode matching") dans les deux interféromètres formant cavités résonantes. Chacun de ces interféromètres a un miroir plan et un miroir concave de 3,12 m de rayon de courbure ; leurs longueurs (0,62 m et 2,5 m) sont choisies de façon que les deux faisceaux gaussiens soient identiques. Ils peuvent être ainsi excités avec la même source et la même optique d'adaptation. Les longueurs de ces cavités sont asservies au maximum de transmission pour l'oscillateur local $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$.

Ces mêmes interféromètres sont aussi éclairés par l'oscillateur local rouge dont la fréquence est ajustée pour obtenir le maximum de transmission dans l'une ou l'autre cavité. Pour permettre d'utiliser l'une ou l'autre de ces deux longueurs d'onde, les miroirs de l'interféromètre sont recouverts d'une couche d'or puis d'un dépôt de couches diélectriques multiples. La finesse réfléchissante à $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ est supérieure à 100 ; elle est environ cinq fois plus petite à $\lambda = 0,633 \mu\text{m}$ de sorte que les franges sont de même largeur en fonction de la longueur de la cavité.

L'oscillateur local rouge est construit de façon telle qu'on peut aussi lui ajouter des bandes latérales par modulation à très haute fréquence à la sortie. On choisit cette fréquence telle que pour les deux bandes latérales la transmission soit maximale ; cela permet la détermination de l'entier de l'ordre d'interférence qui est nécessaire pour les mesures du rapport des longueurs d'onde. Les opérations ci-dessus, complétées par l'échange des miroirs deux à deux, permettent une étude systématique de l'effet

résiduel des pertes de phase à la réflexion.

L'oscillateur local rouge est asservi sur la raie du méthane par la chaîne décrite ci-dessus. C'est une source hautement stabilisée de lumière rouge ($\lambda = 0,633 \mu\text{m}$) qui est disponible pour la mesure de la fréquence d'autres lasers dans cette région et aussi pour évaluer leur stabilité. Nous projetons de laisser cette lumière sortir de l'appareil et de l'envoyer sur un autre appareil où un laser asservi sur une raie de l'iode est en fonctionnement. Là, on effectuera une mesure de la fréquence des battements. Ce résultat, avec la fréquence de référence fournie pour l'asservissement du décalage de l'oscillateur local de $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$, établit le rapport des longueurs d'onde de I_2 et CH_4 .

En plus de ce que nous venons d'exposer, l'appareil contient aussi deux interféromètres Perot-Fabry à miroirs plans, avec un dispositif de balayage, éclairés par l'oscillateur local $\lambda = 0,633 \mu\text{m}$ et par une lampe à krypton 86. En utilisant de nouveau les bandes latérales sur la lumière de l'oscillateur local pour déterminer l'ordre d'interférence et en échangeant les miroirs de l'interféromètre pour corriger les effets de perte de phase, il est possible de mesurer la longueur d'onde correspondant au pic et le profil spectral de la radiation $\lambda = 0,606 \mu\text{m}$ du krypton 86 par rapport à la longueur d'onde de l'oscillateur local et, à partir de ce résultat, par rapport aux longueurs d'onde du méthane et de l'iode. Pour ce faire, on fera varier la fréquence de modulation qui produit les bandes latérales pour explorer le profil de la radiation étalon du krypton 86.

*

Ce rapport a été préparé le 15 juin 1970. A cette date, l'appareil et les divers équipements sont disponibles ou le seront très prochainement. Le montage correspondant au schéma de la figure 1 est commencé. Nous espérons faire des expériences préliminaires en juillet et les mesures en août 1970.

(25 juin 1970)

ANNEXE M 12

Études sur des lasers à gaz

Par W. R. C. ROWLEY

National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

LASERS À GAZ ASSERVIS

Ces dernières années, des lasers hélium-néon asservis ($\lambda = 633 \text{ nm}$) ont été utilisés au N.P.L. pour les mesures de longueur par comptage de franges. Cette méthode s'est avérée très pratique et d'autres appareils utilisant cette technique de mesure sont en cours de mise au point. On a étudié des lasers commerciaux de provenances diverses (Tableau I) pour évaluer leurs possibilités en vue de cette application.

Les valeurs de la longueur d'onde de quelques-uns de ces lasers, mesurées par rapport au krypton 86, ont déjà été publiées⁽¹⁾. La conclusion qui peut être tirée de ces mesures est que les lasers He-Ne asservis sur le Lamb-dip sont sujets à des variations appréciables de longueur d'onde par effet de pression et qu'il y a des écarts importants entre les longueurs d'onde de lasers provenant d'un

(1) J. Opt. Soc. Amer., 56, 1966, p. 259 ; Appl. Optics, 7, 1968, pp. 289-293.

TABLEAU I.- Lasers étudiés au N.P.L.

| Nombre d' exemplaires | Fabricant | Type |
|---|--------------------|---|
| <u>Lasers He-Ne asservis</u> | | |
| 2 | N.P.L. | Excitation en haute fréquence ; Ne naturel ; longueur de la cavité 750 mm ; asservissement sur le maximum d'émission. |
| 5 | Elliot | HNL 6 ; courant continu ; Ne isotopique ; longueur de la cavité 150 mm ; asservissement sur le Lamb-dip. |
| 5 | Spectra-Physics | 119 |
| 2 | Perkin Elmer | 5800 |
| 1 | Rank Taylor Hobson | A112/200 |
| <u>Lasers He-Ne multimodes non asservis</u> | | |
| | Spectra-Physics | 132 (Option 01 avec polarisation) |
| | Spectra-Physics | 120 |

même fabricant. Ainsi, pour des applications exigeant une exactitude meilleure que 1×10^{-7} il s'est révélé nécessaire de mesurer la longueur d'onde de chaque laser et de contrôler sa valeur périodiquement.

L'étude de la stabilité sur des périodes allant jusqu'à quelques heures a été faite par des méthodes de battements. En liaison avec des recherches utilisant un interféromètre à balayage de haute résolution et des essais de stabilité de l'intensité et de la pureté spectrale, cette étude a montré que beaucoup de lasers commerciaux présentent des défauts optiques ou électroniques pouvant sérieusement affecter leur possibilité d'emploi comme étalons de longueur d'onde. Les plus importants de ces défauts sont passés en revue ci-après. Il est clair qu'on ne peut pas suffisamment se fier à ces lasers asservis pour les utiliser dans des mesures précises sans une étude très soigneuse de leurs possibilités.

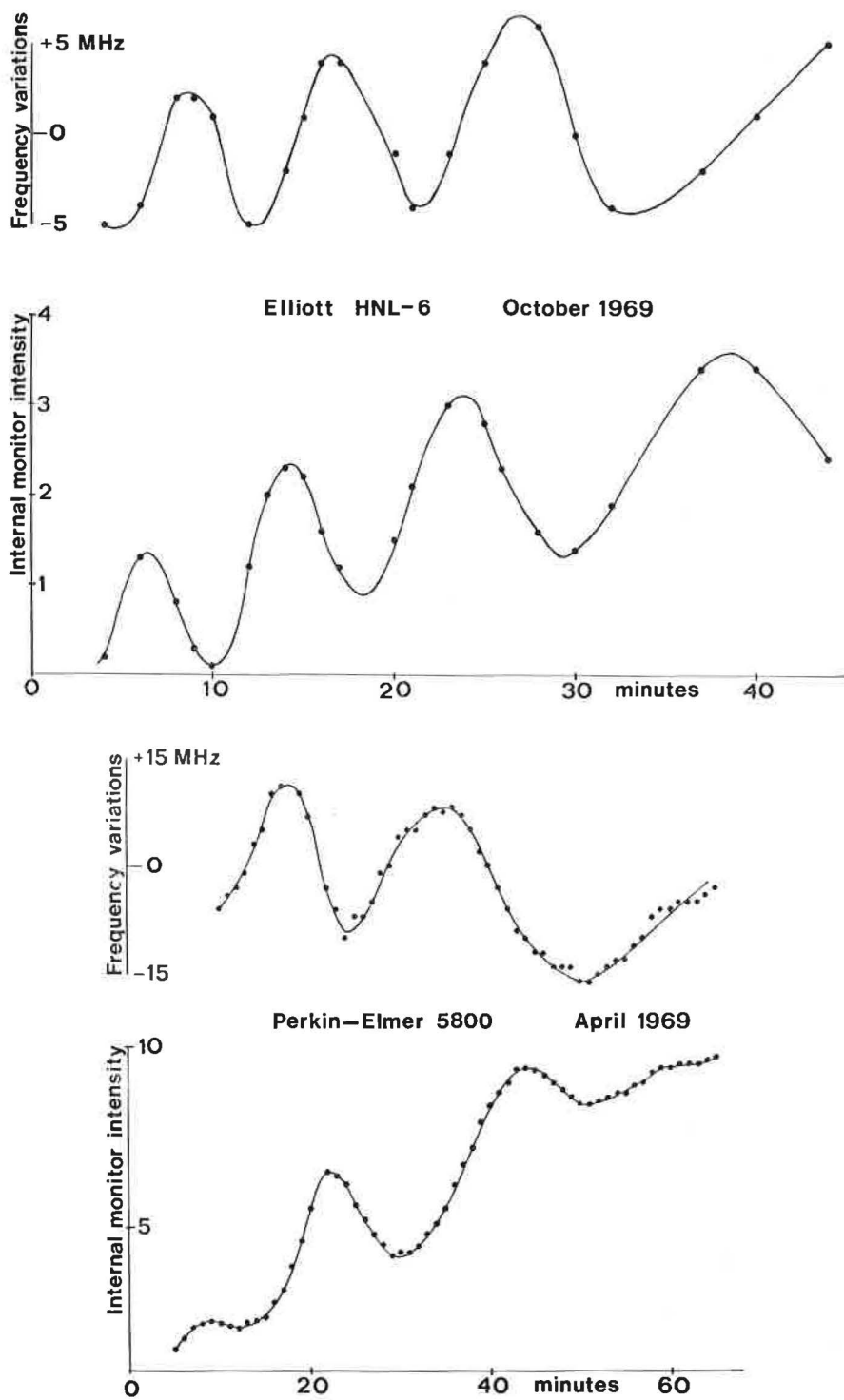
a) Modes hors axe. - Plusieurs lasers ont été fournis avec émission simultanée sur les modes TEM_{01} et TEM_{10} en plus du mode principal. La présence de 10 à 20 % de la puissance provenant de ces modes hors axe est très difficile à mettre en évidence à partir de l'observation de la répartition d'intensité dans le faisceau de sortie, bien qu'elle soit rapidement détectée par l'observation des battements ou avec un interféromètre à balayage. Naturellement la présence de tels modes peut sérieusement perturber la fréquence du mode principal et donne lieu à des variations périodiques de la phase et de la visibilité dans les mesures interférentielles. Le laser Elliot HNL 6 est particulièrement sensible à ce défaut que nous avons également trouvé dans un laser du type Perkin Elmer 5800.

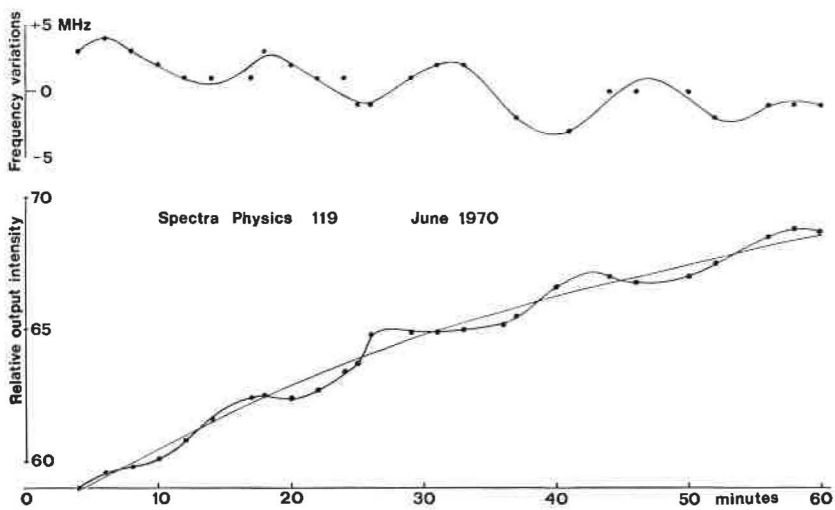
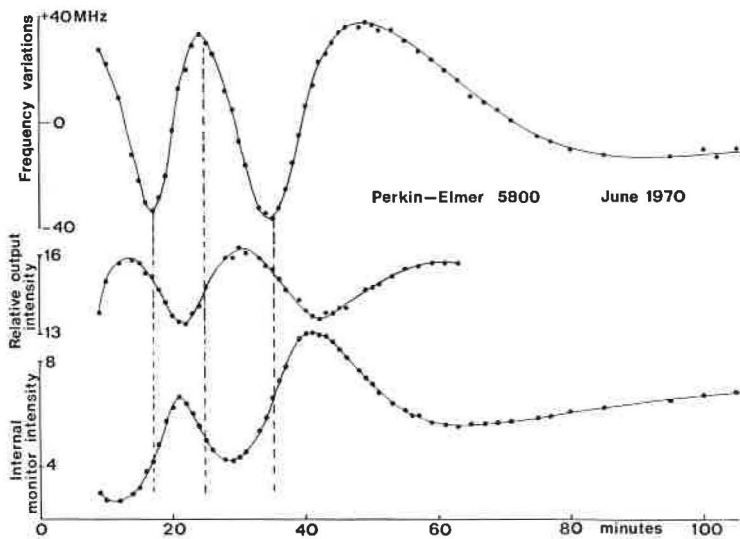
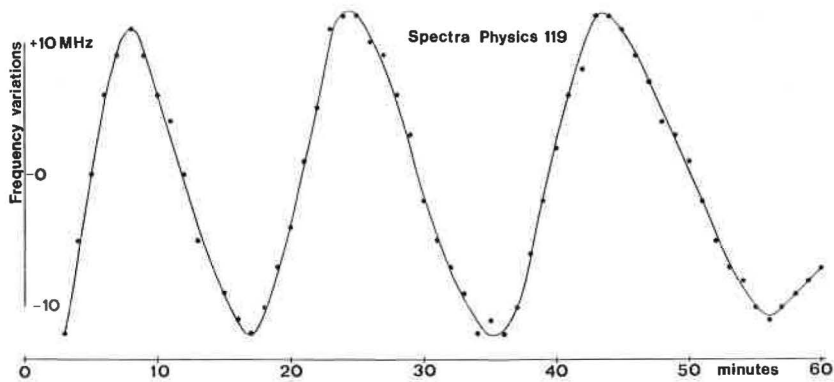
b) Longueurs d'onde multiples. - Nous avons trouvé qu'un laser Elliot HNL 6 émettait simultanément environ 7 % de sa puissance sur la radiation $\lambda = 640,1$ nm.

c) Effet de couplage optique. - On observe dans les lasers asservis sur le Lamb-dip des variations de fréquence et d'intensité dues au couplage optique produit par la lumière réfléchie ou diffusée par les surfaces des éléments incorporés. La modulation de la fréquence du laser entraîne une modulation de la phase de la lumière de retour qui provoque à son tour une modulation parasite de l'intensité et de la fréquence. Pendant la période de chauffage, la dilatation change la phase moyenne de la lumière de retour, ce qui produit des variations cycliques de fréquence. Les variations d'intensité des faisceaux à chaque extrémité du laser sont en opposition de phase entre elles, et en quadrature avec les variations de fréquence. Finalement, la reproductibilité de la longueur d'onde dépend du degré de reproductibilité de la température (Fig. 1 à 5).

d) Appareillage électronique. - On a observé sur plusieurs lasers des défauts de l'électronique se traduisant par une instabilité de la longueur d'onde ou par un déplacement par rapport au Lamb-dip. Dans quelques cas cela est lié au gain insuffisant du système électronique. Un gain faible rend la fréquence du laser sensible à l'entraînement par la dilatation de la cavité ou par les parasites élec-

Fig. 1 à 5. — Variations de la fréquence et de l'intensité en fonction du temps pour trois lasers commerciaux.





triques provenant du générateur incorporé. Il peut aussi exister quelques défauts dans l'amplificateur de courant continu qui tendent à écarter la longueur d'onde stabilisée du centre du Lamb-dip. Il est arrivé qu'un laser Spectra-Physics 119 soit livré avec la phase du système d'asservissement inversée, de sorte que la stabilisation se faisait sur les pics au lieu de se faire sur le Lamb-dip.

LASERS NON ASSERVIS

Pour quelques applications, un laser He-Ne non asservi émettant simultanément deux ou trois modes axiaux fournit une pureté spectrale suffisante. Avec un tel laser la visibilité des interférences dépend non seulement de la différence de marche de l'interféromètre, mais aussi de l'intensité et de la longueur d'onde instantanées de chaque mode individuel. On a montré à la fois théoriquement et expérimentalement que pour un laser du type Spectra-Physics 120 la visibilité ne descend pas en-dessous de 0,5 pour des différences de marche optiques inférieures à 260 mm. En outre, on a montré que les variations de la longueur d'onde effective (pour un interféromètre à deux ondes) dues au changement de l'intensité et de la longueur d'onde des modes, ne dépassaient pas $\pm 1 \times 10^{-7}$ autour de la longueur d'onde moyenne. Les lasers non asservis à cavités plus courtes semblent être moins satisfaisants. Ainsi, pour le Spectra-Physics 132 la visibilité peut descendre à 0,5 à une différence de marche de 170 mm et la variation de la longueur d'onde effective est $\pm 4,5 \times 10^{-7}$.

ANNEXE M 13

**Comparaison internationale de lasers He-Ne
asservis sur le « Lamb-dip »**

Par K. D. MIELENZ

National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique)

Sous les auspices du National Bureau of Standards, des mesures ont été faites au N.B.S., au N.P.L. et à la P.T.B.⁽¹⁾ pour évaluer la reproductibilité de la longueur d'onde de lasers hélium-néon asservis sur le Lamb-dip et fonctionnant à 633 nm.

Dans chacun des trois laboratoires on a comparé la longueur d'onde d'un laser déterminé à celle de l'étalon primaire de longueur. Les trois mesures, qui ont été faites sur une période d'un mois environ, concordait à $\pm 5 \times 10^{-9}$, montrant ainsi une stabilité de la longueur d'onde de ce laser du même ordre de grandeur sur une période de un mois. Comme pour ces mesures on a utilisé cinq lampes à krypton 86 différentes, conformes aux recommandations du C.I.P.M., l'accord obtenu constitue une preuve supplémentaire de la reproductibilité de l'étalon primaire de longueur.

En plus de cette comparaison internationale du même laser, on a mesuré indépendamment, dans chacun des trois laboratoires participants, les longueurs d'onde de 13 autres lasers hélium-néon asservis sur le Lamb-dip, provenant de trois fabricants différents. Ces mesures ont montré que

(1) Mielenz (K.D.) et al., Appl. Optics, 7, 1968, pp. 289-293.

différents types de lasers peuvent en fait émettre des longueurs d'onde différant l'une de l'autre d'environ 2×10^{-7} . Une mesure particulière, effectuée à la P.T.B., a montré une variation de presque 1×10^{-7} de la longueur d'onde d'un laser donné au cours de sa durée de vie. Ces écarts ont été attribués essentiellement aux différences de pressions lors du remplissage ou à des pertes de gaz au cours d'un fonctionnement prolongé.

Pour les lasers du type de ceux qui ont été étudiés, on a trouvé pour la valeur de la longueur d'onde dans le vide :

$$\lambda = 632,991\ 4\ \text{nm} \pm 10^{-7}\ \lambda.$$

Cette valeur, dont l'incertitude n'est que légèrement supérieure à celle des longueurs d'onde admises pour les lampes à mercure 198 ou à cadmium 114, devrait être suffisamment exacte pour bien des applications pratiques de la métrologie des longueurs par lasers.

(25 juin 1970)

ANNEXE M 14

Travaux des laboratoires du N.B.S. à Boulder
sur le laser asservi sur la raie du méthane

Par J. L. HALL et R. L. BARGER

National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique)

1. Les résultats d'expériences sur l'asservissement d'un laser en utilisant la puissante technique de l'absorption moléculaire saturée ont été publiés dans deux articles [1, 2]. Un état plus récent de ce travail est donné par la courbe de la figure 1 où l'on voit qu'on

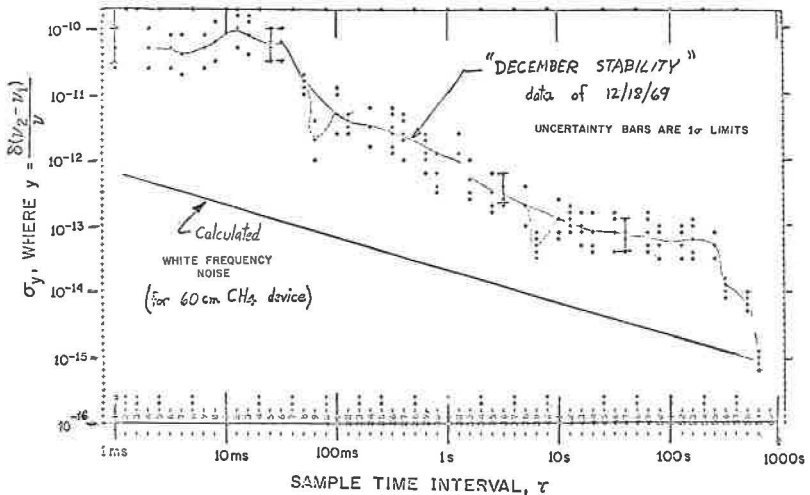


Fig. 1

obtient facilement avec ces méthodes des stabilités supérieures à 10^{-12} sur quelques secondes. Il apparaît aussi clairement que l'on peut obtenir beaucoup mieux.

On a envisagé diverses combinaisons de longueurs d'onde de laser et de transitions moléculaires. On a choisi pour faire des recherches approfondies le système à $3,39 \mu\text{m}$ (combinaison du laser He-Ne à $3s_2 \rightarrow 3p_4$ et de la composante $F_1^{(2)}$ de la branche P(7) dans la bande ν_3 du méthane) car c'est, à notre avis, celui dont on peut espérer l'exactitude la plus grande.

2. La longueur d'onde du laser décrit au paragraphe 1 a été mesurée par rapport à celle de lampes à krypton 86. La limite de l'exactitude que l'on peut obtenir est clairement imposée par les caractéristiques de la lampe à krypton 86. Toutefois, en juin 1970, nos expériences n'avaient pas encore atteint ce niveau ; il subsistait une incertitude apparente à peine inférieure à 10^{-8} . On est en train de faire des évaluations soignées du rôle des corrections de planéité des miroirs et de diffraction.

Ce travail est décrit dans [3].

3. Si l'on considère l'emploi croissant des lasers et les besoins dans de nombreuses recherches scientifiques de faire des mesures de longueurs d'onde avec des précisions dépassant celle que l'on obtient avec des lampes à krypton 86, nous pensons qu'il est nécessaire d'avoir un nouvel étalon défini avec une plus grande précision. Nous proposons que soient adoptés comme étalon provisoire de longueur d'onde les lasers He-Ne asservis sur la raie du méthane décrits au paragraphe 1, et que l'on admette que leur longueur d'onde est connue en mètres à $\pm 1 \times 10^{-11}$ près. Ce procédé a comme avantage le fait que les laboratoires peuvent faire immédiatement des comparaisons à 10^{-11} près. Le petit inconvénient de ce procédé est que l'on risque d'être obligé de réviser la valeur, exprimée en mètres, des grandeurs ainsi mesurées lorsque l'on atteindra un accord ultérieur sur la valeur de la longueur d'onde du méthane mesurée par rapport à celle du krypton.

Après avoir été adopté comme étalon provisoire, nous recommanderions particulièrement l'usage du système à absorption saturée du méthane comme étalon auquel seraient comparés d'autres dispositifs utilisant l'absorption saturée pour la stabilisation de la longueur d'onde.

Nous recommandons que l'on encourage les laboratoires de métrologie et d'étalonnage à entreprendre ou étendre les recherches dans l'application des lasers et de l'absorption saturée à la métrologie.

Ces travaux pourraient aboutir en fin de compte à la redéfinition du mètre.

(16 juillet 1970)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BARGER (R.L.) and HALL (J.L.), Pressure shift and broadening of methane line at $3.39 \mu\text{m}$ studied by laser-saturated molecular absorption. Phys. Rev. Letters, 22, N° 1, 1969, pp. 4-8.
 - [2] BARGER (R.L.) and HALL (J.L.), Use of laser-saturated absorption of methane for laser frequency stabilization. Proc. 23rd Annual Symp. on Frequency Control (Fort Monmouth, New Jersey), 6-8 May 1969, p. 306.
 - [3] BARGER (R.L.) and HALL (J.L.), Precision wavelength measurement of the methane $3.39 \mu\text{m}$ saturated absorption line by laser-controlled interferometry. In "Vith Internat. Conf. Quantum Electronics", Kyoto, Sept. 1970.
-

Recherches sur des Mètres à bouts

Par Y. VÄISÄLÄ

Institut des Recherches Optiques et Astronomiques,
Université de Turku (Finlande)

Des Mètres à bouts en quartz fondu ont été fabriqués et étudiés depuis 1927. Ces Mètres sont utilisés, dans plusieurs pays, comme étalons de référence pour vérifier des fils en invar et pour déterminer la longueur des bases géodésiques à l'aide de ma méthode interférentielle. Depuis 1953, les recherches sont effectuées dans un laboratoire souterrain dans des conditions plus favorables qu'auparavant.

Récemment, de nouveaux matériaux céramiques, à dilatation pratiquement nulle, ont été mis au point ("Cer-Vit", Owens-Illinois ; "Zerodur", Schott und Gen.). Nous en avons fait, pour notre laboratoire, un certain nombre de Mètres à bouts. Nous les comparerons de temps en temps aux Mètres en quartz pour étudier la stabilité de ces nouveaux matériaux, qualité importante par exemple pour la fabrication des grands miroirs des télescopes astronomiques.

L'introduction des Mètres en matière à dilatation pratiquement nulle rend possible la mesure, avec une grande précision, des coefficients de dilatation des nouveaux matériaux et la détermination, par des comparaisons relatives, des coefficients de dilatation des Mètres en quartz avec une précision plus grande que jusqu'à maintenant.

Pour l'étude des Mètres à bouts nous avons installé deux nouveaux comparateurs, selon le même principe que le comparateur installé en 1953 [1]. L'un des comparateurs se trouve dans un tunnel latéral bien isolé, dont on peut faire varier la température entre $- 5^{\circ}\text{C}$ et $+ 50^{\circ}\text{C}$. Les lentilles terminales (plan-convexes, $d = 150\text{ mm}$, $f = 1500\text{ mm}$) sont en silice fondue (Herasil I, Heraeus, Hanau). Des comparaisons des Mètres à bouts y sont effectuées à diverses températures, en maintenant la température constante pendant plusieurs jours. L'autre comparateur a été installé dans le long tunnel du laboratoire, où la température se maintient à 6°C en variant de 1 degré seulement au cours de l'année. Au début, les lentilles terminales du comparateur étaient en verre d'optique, mais plus tard nous les avons remplacées par des lentilles en "Zerodur" ($d = 200\text{ mm}$, $f = 4000\text{ mm}$).

Pour déterminer les épaisseurs d'air entre les plans terminaux du comparateur et les bouts des Mètres, nous employons à présent quatre raies spectrales du cadmium (rouge, verte et deux bleues). Les franges d'égale épaisseur, produites par ces raies, peuvent être photographiées en quelques secondes à l'aide de lunettes à prisme-objectif. Les faces terminales des Mètres en quartz destinés à être utilisés dans les mesures géodésiques sont de forme sphérique (convexe), de 1 m et 5 m de rayons de courbure. Pour nos propres recherches spéciales nous avons fabriqué des Mètres à bouts dont les faces terminales ont un rayon de courbure considérablement plus grand (de 5 à 10 m), ainsi que des Mètres à faces planes.

Pour les étalons à faces terminales sphériques, nous avons pris comme règle de mesurer les diamètres de deux anneaux de Newton intérieurs pour en déduire les épaisseurs d'air entre les sommets des faces de l'étalon et les plans terminaux du comparateur. La précision des résultats des comparaisons est de l'ordre de $\pm 10\text{ nm}$. Cette précision a été atteinte aussi dans la détermination absolue des coefficients de dilatation. Ceux-ci étant très petits dans le cas des nouveaux matériaux, on a pu effectuer les mesures absolues de la manière très simple exposée ci-après.

L'étalon à étudier, entouré d'une enveloppe isolante, est placé au centre du comparateur du long tunnel, entre

les deux Mètres latéraux, et son support est ajusté. L'étalon est ensuite transporté dans le tunnel isolé et placé dans une caisse en bois bien isolée et munie de deux thermomètres. Cette caisse est elle-même introduite dans un "four" en bois bien isolé. Le four est chauffé électriquement jusqu'à une température choisie entre 10°C et 50°C. La caisse y est maintenue pendant vingt-quatre heures au moins, pour être sûr que la température s'égalise. Pour plus de sûreté, toute la pièce a été chauffée. Pour la mesure on ouvre le four, on lit la température de la caisse, on transporte rapidement la caisse près du comparateur du long tunnel, on ouvre la caisse et on place le Mètre, le plus vite possible, au centre du comparateur ; les interférences sont photographiées, simultanément à chacune des deux extrémités. On fait habituellement quatre poses : la première 15 s après avoir ouvert la caisse, les autres à des intervalles de 30 s.

Ces clichés permettent d'extrapoler la longueur de l'étalon à l'instant où la caisse fut ouverte. Dans le cas des étalons en "Zerodur", la correction provenant de l'extrapolation n'a été que de 10 nm. De telles déterminations absolues ont été effectuées non seulement pour des étalons en matériaux "non dilatables", mais encore pour des étalons en quartz et, à titre de contrôle, pour un étalon en "borosilicate crown" (Parra-Mantois) dont le coefficient de dilatation est de $6,4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Même dans ce cas, l'extrapolation a assez bien réussi.

Le procédé permet de comparer l'étalon central à diverses températures, aux étalons latéraux à 6 °C. Le jour suivant, une nouvelle photographie est faite, les étalons étant à la même température. Des résultats de ces comparaisons, on déduit les coefficients de la formule quadratique de dilatation qui suffit pour représenter la variation de longueur de l'étalon entre 0 °C et 40 °C :

$$l(t) = l(20 \text{ °C}) [1 + \alpha (t - 20 \text{ °C}) + \beta (t - 20 \text{ °C})^2].$$

On a ainsi obtenu pour trois étalons :

| | α | β |
|------------------------------|---|--|
| N° 76 ("Zerodur") | $- 0,083 \ 9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ | $- 0,79 \times 10^{-9} \text{ K}^{-2}$ |
| N° 77 ("Zerodur") | $- 0,088 \ 4$ | $- 0,69$ |
| N° 29 (Tube en quartz fondu) | $+ 0,399 \ 1$ | $+ 1,91$ |

A l'aide des équations absolues des étalons en matériaux "non dilatables", on peut déterminer, avec précision, la formule de dilatation pour d'autres Mètres à bouts, soit en matériaux "non dilatables", soit en quartz, par des mesures relatives. A cet effet, ma collaboratrice L. Oterma a effectué, dans le tunnel isolé, des comparaisons relatives à plusieurs températures. Comme résultat provisoire, je peux dire que les coefficients de tous les Mètres en matériaux "non dilatables" étudiés jusqu'à maintenant sont négatifs. Les coefficients du 1^{er} degré obtenus pour sept Mètres en "Zerodur" sont de $-0,084$ à $-0,088 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; ceux de deux Mètres en "Cer-Vit" sont à peu près le double.

Le coefficient de compressibilité linéique des étalons en quartz a été déterminé antérieurement, avec une précision suffisante, par des mesures directes [2]. Pour les Mètres en quartz à tube non fermé nous avons utilisé la valeur $0,74 \times 10^{-11}/\text{Pa}$ ($0,99 \times 10^{-9}/\text{mm Hg}$). La mesure correspondante n'a pas été effectuée dans le cas des Mètres en matériaux "non dilatables", mais le fabricant a indiqué les coefficients d'élasticité et nous en avons déduit pour le coefficient de compressibilité linéique la valeur $0,56 \times 10^{-11}/\text{Pa}$ ($0,75 \times 10^{-9}/\text{mm Hg}$).

Depuis longtemps j'ai exprimé mon opinion que la manière la plus naturelle pour mesurer les longueurs absolues des Mètres à bouts, sur la base de la définition actuelle du mètre, serait d'effectuer les mesures dans le vide, en réduisant les longueurs obtenues à la pression atmosphérique normale. Les corrections seraient de $-0,75 \mu\text{m}$ dans le cas des Mètres en quartz, et de $-0,57 \mu\text{m}$ dans le cas des Mètres en "Zerodur".

Le point faible de nos Mètres en quartz a été la détermination absolue de leur longueur. La mesure absolue que nous avons effectuée [3] a donné pour notre système de Mètres en quartz une longueur de $0,55 \mu\text{m}$ supérieure à celle qui a été obtenue par Kukkamäki en 1933, à l'aide du Prototype N° 5 de la Finlande. La valeur obtenue par Engelhard (P.T.B., Braunschweig) pour deux de nos Mètres en quartz est de $0,12 \mu\text{m}$ inférieure à notre résultat. La mesure effectuée plus tard au B.I.P.M. a donné une longueur de $0,15 \mu\text{m}$

supérieure à notre résultat. Je ne suis pas informé de mesures absolues plus récentes, mais il conviendra d'en effectuer dans divers laboratoires comme on l'a déjà fait remarquer.

(23 août 1970)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] VÄISÄLÄ (Y.) et OTERMA (L.), Comparaisons des Mètres en quartz fondu. Ann. Univ. Turkuensis, A I 72, Turku, 1964.
- [2] KUKKAMÄKI (T.J.), Untersuchungen Über die Meterendmasse aus geschmolzenem Quarz nach lichtinterferometrischen Methoden. Ann. Univ. Turkuensis, A IV 1, Turku, 1933.
- [3] VÄISÄLÄ (Y.) and OTERMA (L.), System of quartzmetres and the absolute length of its gauges. Metrologia, 2, N° 2, 1967, pp. 37-41.
-

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DU MÈTRE

4^e Session (1970)

| | Pages M |
|---|------------|
| Avertissement historique | 5 |
| Liste des Membres | 7 |
| Ordre du jour | 10 |
| Rapport au Comité International des Poids et Mesures | 11 |
| Travaux sur la radiation du krypton 86 de la définition du mètre (Études de la dissymétrie du profil spectral. Variations de la longueur d'onde émise en fonction de la pureté de l'isotope, de la pression, de la densité de courant, de la région du capillaire de la lampe) | 12 |
| Rapports des instituts métrologiques nationaux sur la mise en application de la définition du mètre adoptée en 1960 | 13 |
| Travaux sur les radiations étalons secondaires de longueur d'onde recommandées par le C.I.P.M. en 1963; travaux sur d'autres radiations analogues susceptibles d'être recommandées par le C.I.P.M. (Radiations du ¹⁹⁸ Hg et ⁸⁶ Kr; lampes à ⁸⁶ Kr excitées en haute fréquence) | 13 |
| Lasers utilisés en métrologie (Lasers à He-Ne, à ¹³⁶ Xe, à CO ₂ ; nécessité de les étalonner et de suivre leur évolution) | 14 |
| Radiations de très faible largeur spectrale obtenues par absorption saturée; facteurs qui conditionnent la stabilité de leur longueur d'onde (Études effectuées sur des lasers à He-Ne asservis sur une raie d'absorption du méthane et de l'iode. Mesures faites au J.I.L.A. et au B.I.P.M.) | 15 |
| Méthodes et appareils pour l'étude des qualités métrologiques des longueurs d'onde et pour la mesure des étalons à bouts plans, des étalons à traits et des déplacements (Précision et exactitude des mesures; stabilité des étalons en matériaux à faible coefficient de dilatation; étude statistique des résultats). | 16 |

| | |
|---|----|
| Mesures comparatives internationales de longueur (Propositions pour l'organisation de telles comparaisons sur des étalons matériels en vue d'étudier les qualités des étalons eux-mêmes et de comparer les mérites des méthodes et des appareils de mesure) | 18 |
| Échanges de vues sur l'éventualité d'un changement de la définition de l'unité de longueur, faisant intervenir par exemple les lasers ou la vitesse de la lumière | 19 |
| Questions diverses (Présentation par la P.T.B. de nouveaux modèles de lampes à ^{86}Kr , ^{114}Cd et ^{198}Hg) | 20 |
| Recommandations présentées au Comité International des Poids et Mesures : | |
| <i>Recommandations</i> M 1 (1970) et M 2 (1970) (Poursuite des études sur la radiation étalon primaire et sur les lasers stabilisés) | 20 |
| <i>Recommandation</i> M 3 (1970) (Comparaisons internationales d'étalons matériels de longueur) | 21 |
| <i>Recommandation</i> M 4 (1970) (Mesure des fréquences optiques, de la vitesse de la lumière, et définition du mètre) | 21 |
| Annexes | |
| M 1. <i>Documents présentés à la 4^e session du C.C.D.M.</i> | 23 |
| M 2. <i>Consultation préalable par correspondance</i> (Réponses à un questionnaire du B.I.P.M.) | 26 |
| — Radiation étalon primaire et radiations étalons secondaires recommandées : caractéristiques et conditions de fonctionnement des lampes en usage ; déplacement de la longueur d'onde et profil spectral ; corrections (Questions 1a, 1b, 2a : pp. M 27 à M 35). | |
| — Études sur d'autres radiations secondaires possibles (laser exclu) (Question 2b : pp. M 36 à M 39). | |
| — Lasers à gaz asservis en métrologie des longueurs (Questions 3, 4 : pp. M 39 à M 47). | |
| — Changements et nouveautés, dans la technique des mesures précises de longueur, entraînés par la définition du mètre de 1960 (Question 5 : pp. M 48 à M 50). | |
| — Méthodes et appareils pour l'étude des étalons de longueurs d'onde, et pour la mesure d'étalons à bouts, à traits et de la longueur de déplacements. Organisation de mesures comparatives internationales (Questions 6, 7 : pp. M 50 à M 66). | |
| — Perspectives d'un éventuel changement de la définition du mètre (Question 8 : pp. M 67 à M 71). | |
| M 3. <i>Commentaires sur les perspectives d'une nouvelle définition du mètre</i> , par K. Shimoda | 72 |
| M 4. N.R.L.M. (Japon). — <i>Méthode pour stabiliser la fréquence d'un laser He-Ne non modulé</i> , par K. Tanaka et T. Sakurai | 75 |
| M 5. N.R.L.M. (Japon). — <i>Stabilisation de la fréquence du laser $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ sur une raie du CH_4</i> , par T. Tako, M. Ohí, Y. Akimoto, A. Sugiyama et K. Shimoda | 77 |
| M 6. N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — <i>Commentaires pour la 4^e session du C.C.D.M.</i> | 82 |
| M 7. N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — <i>Sur l'emploi d'un étalon de longueur d'onde pour mesurer un objet matériel</i> , par J. A. Simpson | 86 |
| M 8. N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — <i>Progrès en vue de la mesure de la fréquence de radiations visibles</i> , par K. M. Evenson, J. S. Wells et L. M. Matarrese | 92 |
| M 9. N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — <i>Progrès dans la mesure des fréquences optiques et de la vitesse de la lumière par la technique de modulation en hyperfréquence de la lumière laser</i> , par Z. Bay et G. Luther | 96 |

| | | |
|-------|--|-----|
| M 10. | N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — <i>Rapport sur les progrès de la mesure de la vitesse de la lumière par interférométrie à grande différence de marche</i> , par J. Levine | 101 |
| M 11. | N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — <i>Techniques de synthèse de longueurs d'onde pour la comparaison des étalons primaire et secondaires de longueur d'onde</i> , par R. D. Deslattes, K. D. Mielenz, W. G. Schweitzer et H. P. Layer | 103 |
| M 12. | N.P.L. (Royaume-Uni). — <i>Études sur des lasers à gaz</i> , par W. R. C. Rowley | 108 |
| M 13. | N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — <i>Comparaison internationale de lasers He-Ne asservis sur le « Lamb-dip »</i> , par K. D. Mielenz | 114 |
| M 14. | N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — <i>Travaux des laboratoires du N.B.S. à Boulder sur le laser asservi sur la raie du méthane</i> , par J. L. Hall et R. L. Barger | 116 |
| M 15. | <i>Recherches sur des Mètres à bouts</i> , par Y. Väisälä | 119 |

IMPRIMERIE DURAND

28-LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1972, n° 1420

Dépôt légal, Éditeur, 1972, n° 14

ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 17-2-1972

Imprimé en France