

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

SESSION DE 1961

NOTE

A partir de cette session, les travaux du *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde* sont publiés dans une série indépendante, et non plus dans les Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures.

Les travaux de la première session de ce Comité Consultatif ont été publiés dans les *Procès-Verbaux du Comité International des Poids et Mesures*, 2^e série, tome 26-B, p. S 1 à S 64.

COMITÉ CONSULTATIF
POUR
LA DÉFINITION DE LA SECONDE

AUPRÈS DU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

2^e SESSION — 1961
(11-12 avril)



PARIS
GAUTHIER-VILLARS & C^{ie},
55, Quai des Grands-Augustins.

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 à Sèvres, 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 Métrique, et de sanctionner les résultats des nouvelles déterminations métrologiques fondamentales et les diverses résolutions scientifiques de portée internationale, ainsi que 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 normalement tous les deux ans. Le bureau de ce Comité adresse aux Gouvernements des États membres de la Conven-

(1) Au 31 décembre 1961, trente-huit États sont membres de cette Convention : 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, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U. R. S. S., Uruguay, Vénézuéla, Yougoslavie.

tion du Mètre un *Rapport Annuel* sur la situation administrative et financière du Bureau International.

Devant l'extension des tâches confiées au Bureau International, le Comité International a institué depuis 1927, sous le nom de *Comités Consultatifs*, des organes destinés à le renseigner sur les questions qu'il soumet, pour avis, à leur examen. Ces Comités Consultatifs 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, dont la présidence est généralement confiée à un Membre du Comité International, ont un règlement commun (*Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 1952, 23-A, p. 108); ils sont composés d'un délégué de chacun des grands Laboratoires métrologiques nationaux, de représentants d'Organisations et d'Instituts spécialisés et de spécialistes nominativement désignés. Ces Comités tiennent leurs sessions selon une périodicité irrégulière; ils sont actuellement au nombre de six :

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 Radiations Ionisantes*, créé en 1958.

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*;

— *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (périodicité irrégulière).

Le Bureau International présente en outre à la Conférence Générale un Rapport sur les développements du Système Métrique dans le monde, Rapport publié sous le titre : *Les récents progrès du Système Métrique*.



PRÉSIDENT
du Comité International des Poids et Mesures

R. VIEWEG

LISTE DES MEMBRES

DU

**COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION
DE LA SECONDE**

Président

A. DANJON, Membre du Comité International des Poids et Mesures;
Membre de l'Institut, Directeur de l'Observatoire de Paris,
Paris.

Membres

LABORATOIRES

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [P. T. B.], *Braunschweig* (U. STILLE).

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [N. B. S.], *Washington 25,*
D. C. (J. M. RICHARDSON).

NATIONAL RESEARCH COUNCIL [N. R. C.], *Ottawa* (J. T. HENDERSON).

CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
[C. N. E. T.], *Bagneux* (B. DECAUX).

LABORATOIRE DE L'HORLOGE ATOMIQUE DU CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE, *Besançon* (A. KASTLER,
J. UEBERSFELD).

ISTITUTO ELETTROTECNICO NAZIONALE « GALILEO FERRARIS »
[I. E. N.], *Torino* (C. EGIDI).

CENTRAL INSPECTION INSTITUTE OF WEIGHTS AND MEASURES
[C. I. I. W. M.], *Tokyo* (M. MATSUSHIRO).

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [N. P. L.], *Teddington*
(L. ESSEN).

LABORATOIRE SUISSE DE RECHERCHES HORLOGÈRES [L. S. R. H.],
Neuchâtel (J. DE PRINS, P. DINICHERT).

INSTITUT SCIENTIFIQUE DES MESURES PHYSICOTECHNIQUES ET
RADIOTECHNIQUES DE L'U. R. S. S., *Moscou* (V. I. ERMAKOV;
L. D. BRYZGEV, de l'Institut d'État des Mesures et Instruments
de Mesure, Kharkov).

ORGANISATIONS ET ÉTABLISSEMENTS ASTRONOMIQUES

UNION ASTRONOMIQUE INTERNATIONALE et BUREAU INTERNA-
TIONAL DE L'HEURE (W. MARKOWITZ et N. STOYKO).

ASTRONOMISCHES RECHEN-INSTITUT, *Heidelberg* (W. FRICKE).

U. S. NAVAL OBSERVATORY, *Washington 25*, D. C. (W. MARKO-
WITZ).

COMMONWEALTH OBSERVATORY OF AUSTRALIA, *Canberra*.

INSTITUT D'ASTRONOMIE THÉORIQUE, *Leningrad*.

OBSERVATOIRE ASTRONOMIQUE DE TOKYO, *Mitaka*.

NAUTICAL ALMANAC OFFICE, Royal Greenwich Observatory,
Hailsham (D. H. SADLER).

INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE MARINA, *San Fernando* (A. ORTE
LLEDÓ).

BUREAU DES LONGITUDES, *Paris* (P. TARDI).

OBSERVATOIRE DE NEUCHÂTEL, *Neuchâtel* (J. BONANOMI).

MEMBRES NOMINATIVEMENT DÉSIGNÉS

- J. FUCHS, Direktor der Universitätssternwarte, *Innsbruck*.
J. A. PIERCE, Harvard University, *Boston*, Mass.
L. RANDIĆ, Professeur à l'Université de *Zagreb*.
F. ZAGAR, Directeur de l'Observatoire Astronomique de Brera,
Milano.
Le Directeur du BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES,
Sèvres (Ch. VOLET).
- 

ORDRE DU JOUR DE LA SESSION

1. Nomination d'un Secrétaire et d'un Rapporteur.
 2. Rapports distribués.
 3. Les étalons physiques actuellement en usage.
 4. La précision des étalons actuels et les résultats qu'ils ont fournis.
 5. Comparaisons des étalons atomiques de fréquence.
 6. Possibilités présentes des étalons atomiques de fréquence.
 7. Détermination de la seconde de Temps des Éphémérides.
 8. Recommandations à formuler.
 9. Composition du Comité Consultatif.
 10. Divers.
-

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION
DE LA SECONDE

2^e SESSION (1961)

PROCÈS-VERBAL

DE LA PREMIÈRE SÉANCE

TENUE AU BUREAU INTERNATIONAL

Mardi 11 avril 1961

PRÉSIDENCE DE Mr A. DANJON

La séance est ouverte à 10^h 15^m.

Sont présents : MM. DANJON, BONANOMI, BRYZGEV, DECAUX, DINICHERT, EGIDI, ERMAKOV, ESSEN, FRICKE, HENDERSON, KASTLER, MARKOWITZ, MATSUSHIRO, ORTE LLEDÓ, DE PRINS, RANDIĆ, RICHARDSON, SADLER, STILLE, STOYKO, TARDI, UEBERSFELD, VOLET, ZAGAR.

Assistent à la séance : M^{me} KARTACHEVSKAIA, de l'Institut de Métrologie de Leningrad, Mr TERRIEN, Sous-Directeur du Bureau International, invités.

Excusé : Mr FUCHS.

Mr le PRÉSIDENT rend d'abord hommage aux Membres du Comité décédés depuis la session de 1957 : MM. A. Pérard, A. Scheibe, G. Silva et Sir Harold Spencer Jones. Ils ont joué un rôle considérable dans la métrologie et leurs travaux ont eu une grande portée pour la Science.

Mr le PRÉSIDENT rappelle les recommandations de la première session de ce Comité Consultatif qui a eu lieu en juin 1957. Depuis cette date, les études poursuivies dans de nombreux laboratoires ont rendu utile cette deuxième session dont il donne lecture de l'Ordre du Jour.

Mr Decaux est désigné comme Rapporteur et Mr Terrien comme Secrétaire.

État des études sur les étalons atomiques de fréquence

Mr le PRÉSIDENT donne ensuite la parole à Mr DECAUX, qui présente un résumé des principaux travaux effectués depuis quatre ans sur les étalons atomiques de fréquence (*voir* p. 33).

Peu d'étalons étaient en service régulier en 1957. Actuellement, de nombreux étalons sont utilisés dans des comparaisons. Ce sont des masers à ammoniac ou des résonateurs à jet de césium. Les progrès des masers à ammoniac ont porté sur l'utilisation de raies simples, telles que la raie 3,2 de $^{14}\text{NH}_3$ ou la raie 3,3 de $^{15}\text{NH}_3$, sur les méthodes d'indication de la résonance et sur la recherche des conditions dans lesquelles la fréquence est indépendante des conditions expérimentales. Les perfectionnements des étalons à jet de césium ont porté sur des détails de construction et sur l'augmentation de la distance entre les cavités. La fabrication industrielle de l'Atomichron a permis à divers laboratoires de mettre en service des étalons à jet de césium. Les cellules à vapeur de césium utilisant le pompage optique pour exciter la résonance sont en cours d'étude.

Faisant ensuite allusion au maser à hydrogène atomique (Annexe 1, p. 43) qui semblerait permettre un accroissement considérable de la précision des mesures, Mr DECAUX insiste sur les difficultés d'emploi de tels appareils, pour lesquels les méthodes actuelles de comparaisons ne conviendraient plus.

Abordant la question des comparaisons des étalons atomiques de fréquence, Mr DECAUX rappelle qu'en 1957 une seule comparaison avait été faite. Actuellement, une dizaine de laboratoires travaillent à ces comparaisons. Le transport d'étalons est rarement utilisé. Les comparaisons par l'intermédiaire d'émissions à très haute stabilité d'ondes myriamétriques ou kilométriques permettent une précision approchant 10^{-11} et montrent que les étalons concordent à 10^{-10} près (Annexes 2, 5 et 7).

En conclusion, Mr DECAUX pense que le Comité Consultatif aura à examiner si les progrès effectués depuis quatre ans permettent

— de choisir une transition à l'état physique pur comme base de la nouvelle définition de l'unité de temps;

— de déterminer les corrections à appliquer aux mesures réelles pour les ramener au phénomène pur choisi;

— de définir la valeur de la fréquence du phénomène choisi en fonction de la définition actuelle de la seconde.

Mr le PRÉSIDENT remercie Mr Decaux et propose que ses conclusions constituent pour le Comité un plan de travail. Il signale le parallélisme entre ces opérations et celles qui ont été mises en œuvre pour la nouvelle définition de l'unité de longueur : il a fallu choisir une radiation optique, déterminer ensuite les corrections à appliquer, pour une lampe donnée, afin de tenir compte en particulier de la pression et du courant électrique, et attribuer une longueur d'onde à cette radiation. Mais Mr le PRÉSIDENT met en garde le Comité Consultatif contre le danger que présenterait une décision prématurée concernant une nouvelle définition de la seconde. Il rappelle le précédent de la définition de l'angström qui a créé une unité de longueur théoriquement indépendante du mètre. Cette dualité n'a pas eu de conséquence grave grâce à une chance exceptionnelle. Il pourrait ne pas en être ainsi si l'on agissait de la même façon avec l'unité de temps.

Mr FRICKE s'estime très satisfait du rapport de Mr Decaux.

Mr ESSEN pense que les étalons de fréquence donnent une précision bien supérieure à celle de la définition astronomique de la seconde, et qu'il serait ainsi désirable de modifier dès maintenant la définition de l'unité de temps.

Le Comité accepte unanimement l'ordre de discussion proposé par Mr le PRÉSIDENT : étude des étalons, leurs comparaisons, adoption éventuelle d'une valeur numérique.

**Travaux du L. S. R. H. sur l'étalon à césium
et les masers à ammoniac à simple et à double jet**

Mr le PRÉSIDENT donne la parole aux Membres du Comité spécialistes des étalons de fréquence qui désirent exposer des réalisations nouvelles ou ajouter au rapport de Mr Decaux des résultats récemment obtenus.

Mr DE PRINS (Annexe 8, p. 78) parle rapidement de l'étalon à césium du Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères (L. S. R. H.) qui, avec une distance de 4 m entre ses cavités, donne une largeur de raie de 25 à 40 Hz, soit une précision, c'est-à-dire une stabilité, de 2×10^{-11} et une exactitude, c'est-à-dire une concordance par rapport à la fréquence du phénomène non perturbé, probablement meilleure que 10^{-10} .

Il s'étend ensuite plus longuement sur les masers à ammoniac du L. S. R. H. Le maser utilisant la raie $j = 3, k = 3$ de $^{15}\text{NH}_3$ semble plus favorable que celui qui utilise la raie $j = 3, k = 2$ de $^{14}\text{NH}_3$, car la raie de $^{15}\text{NH}_3$ est plus intense et les oscillations plus faciles. Il s'agit d'un maser à un seul jet dont on connaît maintenant l'exactitude, quelques 10^{-10} à 10^{-9} ; sa stabilité atteint 3×10^{-11} moyennant la stabilisation à 2 ou 3 % près des tensions électriques et du débit de molécules d'ammoniac.

Le L. S. R. H. a construit deux masers à deux jets. Dans le premier appareil, on peut régler indépendamment les débits de molécules d'ammoniac des deux jets et les tensions des focalisateurs. Ces tensions étant rendues égales et maintenues constantes, la fréquence passe par un minimum pour une certaine valeur N_1 de l'un des débits, la valeur N_2 de l'autre débit étant constante; N_1 et N_2 sont d'ailleurs très voisines. Cette fréquence minimale ne dépend plus de la valeur des tensions, mais uniquement des débits; elle décroît en valeur relative de $1,6 \times 10^{-10}$ lorsque le débit s'accroît de 10^{17} molécules par seconde.

Dans le second appareil les tensions sont égales par construction, ainsi que les débits. Les gicleurs, très différents de ceux du premier appareil, sont trois à quatre fois moins directs; la fréquence décroît de 4×10^{-11} lorsque le débit croît de 10^{17} molécules par seconde. Les fréquences des deux appareils, extrapolées pour un débit nul, coïncident à 5×10^{-11} près. Mr DE PRINS a ainsi mis en évidence l'influence sur la fréquence du nombre de molécules se trouvant dans la cavité. Il estime que l'exactitude de ces appareils est meilleure que 10^{-10} . Quant à leur stabilité, seuls les débits interviennent et une variation de 10 % des débits entraîne une variation de fréquence de 5×10^{-12} .

Mr MARKOWITZ demande si la largeur de raie (2 000 Hz) du maser à ammoniac n'est pas défavorable par rapport à celle (30 Hz) du jet de césium. Selon Mr DE PRINS, l'incertitude

sur le profil de la raie entre également en ligne de compte : dans le maser le nombre N des molécules qui interviennent est beaucoup plus grand que pour le césium et, précisément, la stabilité à court terme fait intervenir \sqrt{N} .

Mr DE PRINS indique que l'on est en train de comparer le maser, appareil actif, aux résonateurs à césium, appareils passifs et soumis à l'influence des champs magnétiques.

Mr BONANOMI remarque qu'il ne faut pas sous-estimer les possibilités du maser.

**Expériences et projets sur le résonateur à rubidium
et sur le maser à hydrogène atomique**

Mr le PRÉSIDENT ayant sollicité la présentation d'autres appareils, Mr ESSEN signale les expériences sur le rubidium en cours au N. P. L.

Mr MARKOWITZ pense qu'il faut étendre les comparaisons pour pouvoir prendre une décision avant 1966. C'est bien l'avis de Mr le PRÉSIDENT qui insiste sur la nécessité de comparaisons internes et externes pour juger de la précision et de la reproductibilité des étalons.

Mr TARDI attire l'attention du Comité sur le rapport de Mr Ramsey (Annexe 1, p. 43). Ce rapport contient des promesses pour l'avenir et le Comité devrait se garder de prendre des décisions hâtives.

Mr le PRÉSIDENT désire obtenir des éclaircissements sur l'appareil nouveau présenté dans ce rapport.

Mr KASTLER estime qu'il faut être très prudent; le maser à hydrogène atomique doit donner des raies fines, mais la fréquence risque d'être influencée par les collisions sur les parois. Il pense que le maser à hydrogène atomique pourrait constituer un étalon secondaire.

Mr DE PRINS envisage de réaliser un maser à hydrogène atomique; il s'agit bien d'un véritable maser, à une cavité, avec un temps de vie des atomes excités de 0,3 s. Les chocs sur les parois doivent avoir un effet inférieur à 10^{-13} , mais l'appareil sera extrêmement sensible au champ magnétique. Mr DE PRINS pense que la limite de précision doit se situer vers 10^{-12} ou 10^{-13} .

Mr BONANOMI émet quelques doutes sur la précision annoncée; il voit de nombreuses difficultés, en particulier dans la réalisation d'écrans magnétiques et dans l'accord de la cavité; une étude très sérieuse est donc nécessaire.

Mr HENDERSON remarque que si les réalisateurs du maser à hydrogène ont avancé une précision de 10^{-15} , ils considèrent comme plus probable une précision de 10^{-13} . Il estime que même si on n'atteint pas cette dernière précision, le maser à hydrogène est un système que l'on doit considérer sérieusement; des difficultés devront être surmontées, telles que celle du contrôle du champ magnétique, et l'on doit attendre des expériences ultérieures avant de tirer une conclusion.

Mr RICHARDSON pense que des expériences définitives sur le maser à hydrogène atomique pourraient être faites avant 1966.

La séance est levée à 12^h 20^m.

PROCÈS-VERBAL

DE LA DEUXIÈME SÉANCE

TENUE AU BUREAU INTERNATIONAL

Mardi 11 avril 1961

PRÉSIDENCE DE Mr A. DANJON

La séance est ouverte à 14^h 40^m.

Les présents sont les mêmes qu'à la première séance.

Excusés : MM. FUCHS et TARDI.

Comparaisons des étalons atomiques de fréquence. Temps Atomique

Mr le PRÉSIDENT ouvre la discussion sur les comparaisons entre étalons et demande que l'on parle d'abord des comparaisons effectuées dans un même laboratoire, puis des comparaisons effectuées par voie radioélectrique.

Mr ESSEN rappelle (Annexe 9, p. 87) qu'à la suite de certaines divergences relevées dans la comparaison par radio entre le résonateur à jet de césium du N. P. L. et un Atomichron situé aux U. S. A., on a transporté à Teddington deux Atomichrons. Les comparaisons poursuivies pendant deux ans ont fait apparaître une différence de 2×10^{-10} . Les servomécanismes sont peut-être responsables de cet écart; le jet lui-même donnerait une précision de quelques 10^{-11} .

Répondant à une question de Mr le PRÉSIDENT, Mr ESSEN précise que l'écart entre les deux appareils à césium du N. P. L. est 1×10^{-10} .

Mr RICHARDSON indique à ce sujet (Annexe 5, p. 57) que les comparaisons entre l'Atomichron S 106 de Boulder et les résonateurs à césium NBS I et NBS II ont mis en évidence des variations de fréquence de l'Atomichron dont l'écart-type était 6×10^{-11} .

Mr le PRÉSIDENT demande s'il est possible de contrôler le servomécanisme des appareils utilisant la résonance du césium, indépendamment du reste du système.

Mr ESSEN a fait des études sur ce point et Mr RICHARDSON indique que la National Company a apporté quelques modifications à l'Atomichron à la suite de ces essais.

Mr UEBERSFELD estime que les défauts attribués au servomécanisme viendraient d'un manque de symétrie de la raie. C'est bien l'avis de Mr ESSEN qui juge cette symétrie nécessaire.

Mr DECAUX regrette de ne pouvoir fournir de précisions sur les comparaisons entre Atomichrons, son laboratoire n'en possédant qu'un seul.

Mr BONANOMI rend compte des études faites à Neuchâtel sur l'influence de la modulation de fréquence par rapport à un centrage manuel sur la raie. On n'a pas mis en évidence d'écart supérieur à 10^{-11} . L'asservissement ne crée pas de difficulté essentielle. Une certaine dissymétrie de la raie peut exister en raison, en particulier, de la dissymétrie des deux cavités, mais on l'élimine par rotation de 180° , comme cela est exposé dans le rapport du N. B. S. (Annexe 5, p. 57).

Mr HENDERSON fait état d'expériences préliminaires effectuées récemment au N. R. C. avec deux appareils à jet de césium; la concordance obtenue était de 2×10^{-10} .

Mr le PRÉSIDENT demande ensuite si des comparaisons ont été faites entre des étalons de types différents.

Mr MATSUSHIRO indique qu'on n'a pas effectué au Japon de telles comparaisons entre appareils situés dans un même laboratoire.

Mr le PRÉSIDENT pense qu'il faudra un jour choisir une transition; il est donc particulièrement important de comparer des transitions différentes. Les comparaisons entre appareils presque identiques étant peu instructives, il désirerait que le

Comité Consultatif recommande aux laboratoires de procéder à des comparaisons dans le même laboratoire entre étalons très différents, utilisant des substances différentes.

Mr DECAUX ayant demandé aux Membres du Comité s'ils ont connaissance de résultats relatifs aux transports d'étalons en fonctionnement, Mr MARKOWITZ fait état du transport d'un Atomichron dont la fréquence est restée constante à 1×10^{-11} près, ce qui permettrait de garder le temps à $1 \mu\text{s}$ près par jour.

Mr RICHARDSON souligne les difficultés de cette expérience, en particulier à cause de la force de Coriolis.

Mr le PRÉSIDENT ouvre la discussion sur les comparaisons par transmissions radioélectriques.

Mr MARKOWITZ commente le rapport de l'U. S. Naval Observatory (Annexe 2, p. 45). Se référant au tableau A, il indique que les premières comparaisons entre le N. P. L. et le Naval Observatory étaient faites au moyen d'impulsions horaires. Il rappelle que les comparaisons ne sont instructives que si elles portent sur des multiples de vingt-quatre heures. La moyenne des résultats obtenus par plusieurs laboratoires a permis de stabiliser la fréquence de l'émetteur NBA à 5×10^{-11} près. La production d'une telle fréquence ainsi stabilisée doit rendre plus faciles les comparaisons entre divers laboratoires. Mr MARKOWITZ pense qu'en une journée on peut comparer des fréquences à 1×10^{-11} près.

Examinant ensuite le tableau B qui donne l'erreur probable pour divers laboratoires et divers mois, il attire l'attention sur la réduction de cette erreur obtenue à Richmond à la suite de l'amélioration de l'oscillateur à quartz de référence.

D'après les résultats du tableau C, il estime qu'en utilisant les émetteurs NBA et GBR on peut déterminer les fréquences à 10^{-11} près.

Mr BONANOMI commente ensuite le rapport de l'Observatoire de Neuchâtel (Annexe 7, p. 73). Il insiste sur les diverses méthodes de comparaisons employées : utilisation de signaux horaires pour le temps atomique intégré, de la fréquence moyenne mensuelle de l'émetteur WWV, de mesures de phase d'ondes porteuses myriamétriques. La précision du temps intégré est 7×10^{-12} . Les courbes jointes au rapport montrent que les mesures utilisant l'émetteur WWV sont satisfaisantes. La

précision des mesures faites sur des porteuses myriamétriques pourrait être augmentée par une amélioration des récepteurs et par un allongement des périodes de comparaison.

Mr ESSEN accepte les résultats expérimentaux que MM. Markowitz et Bonanomi ont exposés, mais ces comparaisons sont affectées par les variations d'indice de l'air. Il n'est pas sûr que la compensation qui se produit sur une période de 24 h soit absolument rigoureuse.

Mr DECAUX précise que les valeurs trouvées à Bagneux sont les mêmes que celles qui sont publiées dans le rapport de Mr Markowitz (Annexe 2), mais il regrette que l'émetteur NBA s'arrête une fois par semaine l'après-midi, ce qui supprime deux intervalles de 24 h par semaine et réduit le nombre de jours d'observation dans le mois. Mr BONANOMI fait alors remarquer qu'il suffit de faire pour la période d'arrêt une interpolation sur la phase de l'onde reçue. L'erreur ainsi introduite est rigoureusement annulée en faisant la moyenne.

Mr MARKOWITZ indique que cet arrêt est nécessaire pour l'entretien de l'émetteur, mais il espère pouvoir porter à 10 ou 20 jours la durée de fonctionnement continu. La précision, actuellement de 10^{-10} , sera améliorée.

Mr le PRÉSIDENT demande si l'on a pu observer des variations saisonnières dans les mesures : les courbes relevées quotidiennement doivent évoluer d'un jour à l'autre.

Mr DECAUX fait remarquer que l'été la période nocturne stable est courte et la période diurne stable est longue; l'hiver c'est l'inverse, mais on n'a rien mis d'autre en évidence.

Mr BONANOMI pense que le problème se présente de la façon suivante : on étudie l'ionosphère en supposant que nos émetteurs fournissent une fréquence stable et nous, nous supposons l'ionosphère stable pour faire nos mesures de fréquences !

Mr le PRÉSIDENT met en garde les expérimentateurs contre tous les facteurs qui pourraient intervenir, étant donné la précision à laquelle on arrive. Il est très heureux d'avoir sous les yeux des tableaux de résultats traduisant les nombreuses comparaisons qui ont déjà été faites, mais il désirerait que celles-ci soient étendues à de nouveaux laboratoires et pense que le Comité pourrait formuler une résolution tendant à

améliorer les dispositifs de réception et à multiplier les comparaisons multilatérales.

Mr BONANOMI rend hommage à Mr Markowitz qui a organisé toutes les comparaisons actuelles.

A la suite d'une question de Mr le PRÉSIDENT, Mr STILLE déclare que l'étalon de la P. T. B. n'est pas encore en service. Un maser expérimental est en fonctionnement, un maser étalon en construction, de même qu'un étalon à césium, mais des recherches sont en cours sur des dispositifs nouveaux et les appareils en étude devraient se révéler supérieurs aux appareils existants (Annexes 10, 11 et 12).

Mr STILLE indique que son laboratoire désire participer aux comparaisons dès qu'il en aura la possibilité technique. Mr ERMAKOV émet le même désir pour le laboratoire de l'U. R. S. S., ainsi que Mr MATSUSHIRO pour le laboratoire du Japon.

Mr STΟΥΚΟ commente ensuite le rapport du Bureau International de l'Heure sur le temps atomique intégré (Annexe 13, p. 99). Une nette amélioration est apparue lorsqu'en 1958 on est passé de 3 à 5 étalons pour constituer une horloge atomique intégrée. Il subsiste encore par rapport à l'étalon moyen des écarts systématiques des étalons atomiques, de l'ordre de 1×10^{-10} , qui peuvent donner 0,003 s par an. On constate que l'erreur diminue au cours des années 1957, 1958 et 1959, mais pour que cette diminution se poursuive il faut se mettre d'accord sur les constantes de réduction. On a un accord excellent entre Neuchâtel et Teddington.

Mr le PRÉSIDENT pense qu'il faudrait normaliser les procédés d'intégration pour éviter d'avoir plusieurs échelles de temps obtenues à partir du même étalon. Peut-être faudrait-il aussi normaliser les procédés de réception.

Mr EGIDI ayant évoqué la question des distances, Mr DECAUX précise que l'on a actuellement une bonne connaissance des résultats obtenus à grande distance en ondes myriamétriques, mais on n'a pas de renseignements sur les possibilités des ondes kilométriques pour des distances de quelques milliers de kilomètres.

Mr MARKOWITZ fait remarquer que dans ces conditions on reçoit probablement l'onde de sol.

Mr RICHARDSON rappelle des expériences effectuées sur 100 kHz avec une chaîne de stations utilisant l'onde de sol et qui ont fourni une précision de 1 μ s.

Détermination de la seconde de Temps des Éphémérides

Mr SADLER constate les grands progrès qui ont été faits dans le domaine des étalons atomiques et reconnaît que les procédés astronomiques ne permettent pas de mesurer la seconde avec la précision qu'autorisent actuellement les étalons de fréquence (voir Annexes 14 et 2).

La détermination du Temps des Éphémérides se heurte à des difficultés d'observations et à des difficultés théoriques, en partie surmontées, mais aussi à une difficulté fondamentale qui tient à ce que l'unité de temps est définie à l'aide de la position de la Terre par un intervalle de temps commençant en 1900,0. Actuellement, les seules observations pouvant donner lieu à des mesures sont celles de la Lune et la relation précise entre le mouvement de la Lune et le mouvement apparent du Soleil est difficile à améliorer. La précision que l'on peut attendre de la détermination de la seconde de Temps des Éphémérides peut être évaluée à quelques 10^{-9} .

Mr MARKOWITZ donne quelques précisions sur les nouvelles éphémérides de la Lune; on pourrait, après correction, déterminer le Temps des Éphémérides en utilisant les observations faites depuis 1955.

A ce sujet, Mr SADLER indique qu'il a reçu de C. B. Watts les corrections d'irrégularités du bord de la Lune se rapportant aux occultations observées en 1958. Une analyse préliminaire a montré que l'application de ces corrections diminuait de moitié l'erreur probable d'une seule observation.

Mr le PRÉSIDENT voudrait savoir comment C. B. Watts détermine le centre de la Lune, mais Mr MARKOWITZ déclare ne pas être en mesure de donner des détails sur ce point.

Mr le PRÉSIDENT rappelle que cette question a été étudiée en U. R. S. S. par A. A. Yakovkin; le centre des masses pourrait

se trouver à près de 1 km du centre de figure. Au sujet de la détermination de la relation entre les mouvements de la Lune et du Soleil, il pense que l'on pourrait peut-être utiliser les observations d'éclipses.

Mr SADLER dit qu'il faut tenir compte de la force de freinage due aux marées, qui n'est peut-être pas restée constante. Mr le PRÉSIDENT ajoute qu'il y aura toujours une incertitude sur le Temps des Éphémérides, ne serait-ce que celle qui est due aux erreurs sur les constantes de Newcomb.

Mr RANDIĆ fait remarquer que pendant un intervalle de quelques années le Temps des Éphémérides n'est pas bien connu, et par suite la différence ΔT entre T. E. et T. U. n'est pas connue avec la précision nécessaire. L'éclipse de Soleil de février 1961 n'a pu être prédite avec exactitude parce que le ΔT pour 1961 était donné différemment dans les diverses Éphémérides. Il serait utile de donner une estimation de ΔT fondée sur les comparaisons du Temps Atomique et du Temps Universel.

Mr SADLER répond qu'il est plus facile d'exprimer le Temps Atomique en fonction du Temps des Éphémérides qu'en fonction du Temps Universel.

Un comité de rédaction est alors constitué afin de mettre au point le texte des recommandations à soumettre au Comité Consultatif; il est composé de MM. Bonanomi, Markowitz et Terrien.

La séance est levée à 17^h.

PROCÈS-VERBAL

DE LA TROISIÈME SÉANCE

TENUE AU BUREAU INTERNATIONAL

Mercredi 12 avril 1961

PRÉSIDENCE DE Mr A. DANJON

La séance est ouverte à 9^h 45^m.

Les présents sont les mêmes qu'à la première séance.

Excusés : MM. FUCHS, KASTLER, UEBERSFELD.

Temps Atomique (suite)

Mr DE PRINS désire revenir sur la question du Temps Atomique intégré et expose la méthode utilisée à Neuchâtel : on mesure périodiquement la fréquence d'une horloge à quartz et on suppose qu'elle varie linéairement entre deux mesures. L'erreur commise en utilisant cette méthode d'intégration est évaluée par l'emploi simultané de plusieurs horloges à quartz. Les résultats sont exposés dans l'Annexe 8. A Neuchâtel, le Temps Atomique intégré est déterminé indépendamment par l'Observatoire et le L. S. R. H.; l'accord est complet.

Mr le PRÉSIDENT pense que les écarts éventuellement observés proviennent des valeurs attribuées aux fréquences des étalons.

Mr DE PRINS précise que ces valeurs sont obtenues par des transmissions radioélectriques qui introduisent une erreur de quelques 10^{-11} , soit de l'ordre de 1,5 ms par an.

Mr BONANOMI attire l'attention du Comité sur la différence qui existe entre la comparaison des fréquences et la conservation

de l'heure atomique. Ce dernier problème est très important; l'heure atomique conservée par Mr Markowitz a servi à étudier la rotation de la Terre, mais dans l'avenir elle sera sans doute utilisée dans des expériences de physique de longue durée. Mr BONANOMI se demande si actuellement la conservation de l'heure est garantie par un nombre suffisant d'horloges et ce qui arriverait si les émetteurs WWV et NBA cessaient de fonctionner.

Mr MARKOWITZ estime que le Temps Atomique (T. A.) a son importance, mais il ne donne rien de plus que les comparaisons de fréquence. D'ailleurs, l'époque intéresse uniquement l'Union Astronomique Internationale, qui pourra évoquer ce problème à son Assemblée générale de 1961 à Berkeley où les physiciens seront représentés.

C'est également l'avis de Mr STILLE qui, établissant un parallèle avec la question des températures, fait remarquer que la Convention du Mètre s'occupe à la fois des intervalles de température et des échelles de température, alors qu'elle ne doit s'occuper que de l'unité d'intervalle de temps puisque les résolutions 9 et 10 de la Onzième Conférence Générale emploient les expressions « unité fondamentale de temps » ou « unité d'intervalle de temps ».

Mr le PRÉSIDENT ne pense pas que cela interdise aux Membres du Comité de discuter entre eux de cette question : d'ailleurs, en 1957, un sous-comité du Comité Consultatif l'avait déjà abordée au cours d'une réunion tenue à l'Observatoire de Paris. Mr STOYKO précise qu'à l'Observatoire de Paris on établit le Temps Atomique à partir d'un Atomichron sans correction. On utilise trois horloges à quartz; la discordance était de 0,001 s pour les années 1959 et 1960.

Mr RICHARDSON expose alors le point de vue du physicien sur les échelles de temps et montre qu'il faut établir des relations entre elles. La relation entre deux échelles quelconques de temps uniforme est simplement donnée en fixant deux constantes : le rapport de la grandeur des unités et l'écart entre les deux origines. Cette relation peut être facilement généralisée dans le cas où l'une des échelles n'est pas uniforme en fonction de l'autre, en permettant au rapport des unités de changer avec le temps selon la nécessité. Pour le problème en question, nous pouvons alors adopter les processus opérationnels parfaits

tement valables suivants (au sens de Bridgman) : 1° définir l'unité et une échelle de temps atomique subséquente par l'emploi d'un étalon atomique; 2° relier l'origine de l'échelle atomique à l'époque fondamentale par l'observation de l'époque particulière du temps des éphémérides à laquelle l'échelle atomique a commencé.

Mr STILLE fait remarquer que les astronomes observent des époques et obtiennent par dérivation la marche de leurs horloges et une unité d'intervalle de temps, alors que les physiciens observent des intervalles de temps et les intègrent.

Mr MARKOWITZ pense qu'une horloge atomique ne peut pas donner le T. U. ₂ qui varie de façon imprévisible. Les intervalles de temps obtenus par découpage du T. U. ₂ ne peuvent pas servir en physique.

Mr FRICKE remarque que le T. U. ₂ et le T. A. sont pourtant fondés tous les deux sur des phénomènes récurrents.

Mr RANDIĆ note que le T. E. est obtenu jusqu'à présent uniquement comme un « temps lunaire »; d'après les comparaisons entre T. U., T. A. et T. E. données dans le rapport de W. Markowitz et R. G. Hall (Annexe 3, p. 52), il semble que le prétendu T. E. soit encore moins uniforme que le T. U.

Mr DE PRINS attire l'attention sur la distinction entre *époque* et *intervalle de temps*; il n'y a pas de point zéro dans les époques. Il pense que l'on pourrait fort bien définir une unité de temps et utiliser une seconde qui en serait différente, mais qui lui serait liée par une relation à définir périodiquement. Il souhaite enfin que tous les laboratoires possédant des étalons atomiques conservent le temps.

Mr le PRÉSIDENT insiste sur la nécessité de définir un zéro, même arbitraire, pour l'échelle de temps; il faut bien dater les événements terrestres et astronomiques dans un certain calendrier. Il souhaite l'avènement du Temps Atomique qui éviterait à l'Astronomie d'utiliser, pour étudier les mouvements des astres, l'unité de temps que ces mêmes mouvements servent à définir, mais il s'oppose à une destruction de l'échelle de temps.

Mr STILLE estime que la différence entre l'échelle de Temps des Éphémérides et d'autres échelles servant à la réalisation de celle-ci, par exemple celle qui est déduite du mouvement

de la Lune, est très semblable à la différence entre l'Échelle Thermodynamique et l'Échelle Internationale Pratique de Température.

Mr BONANOMI précise que dans sa précédente intervention il a voulu dire que le Temps Atomique est en somme un sous-produit automatique des comparaisons et qu'il est souhaitable que l'on étudie la sécurité du système qui permet de le définir, afin que la probabilité d'une défaillance soit très faible; il faut multiplier les comparaisons d'échelles de Temps Atomique et conserver le Temps Atomique dans le plus grand nombre d'endroits possibles.

Mr ESSEN souligne la nécessité d'une intégration pour obtenir le T. A.

Mr MARKOWITZ explique comment le T. A. est intégré : ce sont souvent des observatoires ou des laboratoires nationaux qui font cette intégration, alors que les laboratoires possédant des étalons définissent les fréquences. Ainsi, le Naval Observatory définit le Temps A₁ à l'aide de neuf étalons, ce qui explique sa qualité. Mr MARKOWITZ admet que chaque pays publie son Temps Atomique, mais il souhaite que le T. A. soit unique à l'intérieur d'un même pays.

Mr BONANOMI constate que Mr Markowitz n'est pas opposé à sa proposition de comparer les Temps Atomiques.

Recommandations

Mr le PRÉSIDENT soumet à l'approbation du Comité Consultatif les deux recommandations proposées par le Comité de rédaction.

RECOMMANDATION 1

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

CONSTATANT avec satisfaction que l'exactitude des étalons atomiques de fréquence s'est améliorée jusqu'à environ $\pm 1 \times 10^{-10}$, mais reconnaissant cependant que des améliorations des dispositifs en service sont encore possibles et que des dispositifs imaginés récemment paraissent susceptibles d'une exactitude égale ou meilleure,

RECOMMANDE que l'on poursuive l'étude de ces étalons en vue d'obtenir leur fréquence affranchie de toute influence perturbatrice.

Mr EGIDI désirerait que l'on modifie ainsi la fin de la recommandation : « ... affranchie dans la mesure du possible de toute influence perturbatrice », mais Mr le PRÉSIDENT pense que l'expression « en vue » donne déjà ce sens à la phrase.

Mr DINICHERT propose de supprimer « toute » (toute influence perturbatrice). Cet amendement est repoussé par 13 voix contre 3.

Le texte initial de la Recommandation 1 est alors soumis au vote et adopté à l'unanimité.

Après quelques modifications de détail dues en particulier aux interventions de MM. DE PRINS et BONANOMI, le texte suivant est adopté à l'unanimité :

RECOMMANDATION 2

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde, ayant pris connaissance des comparaisons d'étalons atomiques de fréquence effectuées et des résultats obtenus, et considérant que ces comparaisons permettent d'étudier la stabilité et l'exactitude de ces étalons,

RECOMMANDE que soient poursuivies et étendues les comparaisons des fréquences et des échelles de temps déterminées par des étalons de modèles aussi différents que possible, soit par voie radioélectrique, soit par des expériences en un même laboratoire,

et RECOMMANDE que les résultats de ces comparaisons soient portés rapidement à la connaissance de tous les laboratoires intéressés.

Après discussion sur l'amélioration souhaitable de la précision à la réception des ondes radioélectriques, il n'est pas jugé utile de faire une recommandation sur ce sujet.

Mr RICHARDSON propose que dans une troisième recommandation le Comité Consultatif reconnaisse l'impossibilité de déterminer le Temps des Éphémérides à mieux que quelques 10^{-11} et se déclare disposé à préparer avant 1965 une définition de l'unité de temps à soumettre à l'attention du Comité International des Poids et Mesures.

Mr MARKOWITZ pense qu'il faudrait prévoir cette définition pour 1964.

Mr BONANOMI est d'accord pour qu'une date figure dans la recommandation afin de hâter les études.

Mr le PRÉSIDENT fait remarquer que le Comité International peut fixer au Comité Consultatif une date limite pour une nouvelle définition, mais non l'inverse; le Comité Consultatif ne peut que faire des recommandations aux Laboratoires.

Au sujet de la date il suffit d'inclure dans la recommandation que la nouvelle définition serait soumise à la Douzième Conférence Générale des Poids et Mesures.

La mise au point de la première partie du texte de la recommandation conduit à reconnaître que la seconde des Éphémérides ne peut être déterminée avec une précision suffisante pour les besoins de la Science et en particulier de la Métrologie, et que les étalons atomiques permettraient une précision meilleure. Il est donc décidé d'inclure dans le texte une comparaison entre ces deux précisions.

Mr DE PRINS et Mr le PRÉSIDENT mettent définitivement au point le texte suivant, qui est adopté à l'unanimité.

RECOMMANDATION 3

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

CONSIDÉRANT que la précision avec laquelle peut être déterminée la seconde des Éphémérides est inférieure à la précision que permettrait l'emploi d'étalons atomiques,

RECOMMANDE aux Laboratoires de pousser leurs recherches sur les étalons atomiques de fréquence assez activement pour qu'une nouvelle définition de l'unité de temps puisse être soumise à la Douzième Conférence Générale des Poids et Mesures.

Mr DINICHERT demande quels sont les laboratoires intéressés par la Recommandation 2. Mr le PRÉSIDENT répond que ce sont les laboratoires mentionnés dans la liste des Membres du Comité Consultatif (voir p. 7).

Sur une question de Mr TERRIEN, les Membres indiquent les documents présentés qu'ils désirent publier en annexes des procès-verbaux des séances.

Mr le PRÉSIDENT félicite alors le Comité pour l'excellente atmosphère qui a régné au cours de cette seconde session et

pour les perspectives ouvertes par les travaux effectués depuis la session de 1957. Il pense que la Douzième Conférence Générale sera en mesure d'adopter une nouvelle définition de la seconde. Il remercie les Membres du Comité de leur concours et de leur amabilité.

Mr ESSEN, au nom du Comité Consultatif, remercie Mr le Président d'avoir conduit avec beaucoup de clarté les débats, qui ont permis d'obtenir des conclusions importantes à la satisfaction de tous.

La séance est levée à 13^h.

DEUXIÈME RAPPORT
DU
COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE
AU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Par B. DECAUX, Rapporteur

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde a tenu sa deuxième session au Pavillon de Breteuil, à Sèvres, les mardi 11 et mercredi 12 avril 1961.

Étaient présents : Mr DANJON, Président; MM. BONANOMI, BRYZGEV, DECAUX, DINICHERT, EGIDI, ERMAKOV, ESSEN, FRICKE, HENDERSON, KASTLER, MARKOWITZ, MATSUSHIRO, ORTE LLEDÓ, DE PRINS, RANDIĆ, RICHARDSON, SADLER, STILLE, STOYKO, TARDI, UEBERSFELD, VOLET, ZAGAR, Membres du Comité Consultatif; M^{me} KARTACHEVSKAIA, Mr TERRIEN, invités.

Mr DECAUX fut désigné comme Rapporteur et Mr TERRIEN comme Secrétaire.

PROGRAMME DE LA SESSION

La Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures, réunie à Paris en octobre 1960, avait adopté les deux résolutions suivantes relatives à la définition de l'unité de temps.

RÉSOLUTION 9

La Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures,
CONSIDÉRANT le pouvoir donné par la Dixième Conférence Générale des Poids et Mesures au Comité International des Poids et Mesures de prendre une décision au sujet de la définition de l'unité fondamentale de temps,

CONSIDÉRANT la décision prise par le Comité International des Poids et Mesures dans sa session de 1956,

RATIFIE la définition suivante :

« La seconde est la fraction $1/31\,556\,925,974\,7$ de l'année tropique pour 1900 janvier 0 à 12 heures de temps des éphémérides ».

RÉSOLUTION 10

La Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures,

APPRÉCIANT les résultats expérimentaux obtenus par des laboratoires compétents pendant les dernières années, qui prouvent qu'un étalon d'intervalle de temps basé sur une transition entre deux niveaux d'énergie d'un atome ou d'une molécule peut être réalisé et reproduit avec une précision très élevée,

CONSIDÉRANT qu'un tel étalon atomique d'intervalle de temps est indispensable pour les exigences de la haute métrologie,

INVITE les laboratoires nationaux et internationaux experts dans ce domaine à poursuivre aussi activement que possible leurs études,

INVITE le Comité International des Poids et Mesures à coopérer sans retard avec les organismes internationaux intéressés et à coordonner les travaux en vue de permettre à la Douzième Conférence Générale de prendre une résolution sur ce point.

Déjà, lors de sa première session en 1957 le Comité Consultatif avait adopté trois recommandations soulignant l'intérêt de recherches poussées sur les étalons atomiques de fréquence et de leurs comparaisons internationales, et souhaitant que l'Union Radioscopique Internationale (U. R. S. I.) organise de telles comparaisons.

La Commission 1 de l'U. R. S. I., dans ses réunions de 1957 et 1960, a discuté ces problèmes et recueilli une importante documentation sur l'état des travaux entrepris, tant sur les étalons eux-mêmes que sur leurs comparaisons. Les rapports qui ont été présentés au Comité Consultatif, et les discussions à leur sujet, ont apporté de nouvelles informations. Grâce à elles et à celles qui ont pu être recueillies de diverses autres sources, nous donnons ci-après un aperçu d'ensemble sur l'état actuel de la question; cependant, cet aperçu est forcément incomplet et peut comporter certaines lacunes.

Pour que le Comité Consultatif puisse éventuellement proposer une nouvelle définition de l'unité de temps, il faudra :

1. choisir une transition, à l'état physique pur, susceptible de servir de base à cette définition;
2. déterminer les conditions expérimentales d'emploi de cette transition, et les corrections à appliquer aux mesures réelles pour

ramener la fréquence expérimentale à la fréquence du phénomène physique pur;

3. exprimer, en fonction de la définition de la seconde adoptée par la Onzième Conférence Générale, la fréquence de la transition choisie.

Il y aura naturellement lieu, pour chacune de ces déterminations, d'apprécier la précision avec laquelle les diverses mesures nécessaires pourraient être exécutées, leur reproductibilité et leur stabilité.

En 1957, il existait seulement en service quelques résonateurs à jet de césium, un certain nombre d'étalons à absorption dans l'ammoniac et quelques masers à ammoniac. Parmi ces appareils, très peu étaient réellement utilisés pour des déterminations de fréquence. Cependant, de nombreux appareils de modèles divers étaient à l'étude dans le monde entier et des recherches étaient entreprises pour la mise au point d'étalons nouveaux. Nous verrons qu'à l'heure actuelle de nombreux étalons sont en service régulier et mesurés par rapport aux garde-temps.

De même, en 1957, une seule comparaison avait été faite, entre le résonateur du N. P. L. et un Atomichron aux États-Unis. Maintenant, près d'une dizaine de laboratoires font des comparaisons permanentes. Il est ainsi possible d'effectuer des moyennes et de suivre l'évolution individuelle des divers appareils.

Rappelons aussi que, pour constituer un véritable étalon, de tels appareils doivent être non seulement précis et stables, mais encore capables de fonctionner longtemps et surtout être reproductibles : on doit pouvoir démonter et remonter un appareil, ou même en construire un nouveau, et ensuite obtenir la fréquence voulue dans des conditions normales et avec la précision admise, et ce sans ajustage par rapport à un autre étalon.

ÉTALONS ATOMIQUES DE FRÉQUENCE

Masers à ammoniac. — Des divers renseignements recueillis, il ressort que l'emploi de l'absorption dans l'ammoniac a été abandonné et que ce corps est utilisé exclusivement dans des masers. Ceux-ci ont d'ailleurs reçu d'importants perfectionnements permettant de les rendre plus indépendants des causes de variation de fréquence; les principales de ces causes étaient : le désaccord de la cavité résonnante, la tension appliquée entre les électrodes du focaliseur, le nombre de molécules dans le jet, l'effet Stark résiduel, etc. Les défauts dus à la cavité résonnante, qui peuvent être très importants, ont été réduits par divers procédés; l'un d'eux consiste (dans le cas des raies sans structure hyperfine)

à repérer l'accord exact en observant l'annulation de la modulation par effet Zeeman. Les écarts de fréquence produits par les variations de la tension du focaliseur ou du nombre de molécules dans le jet, sont dus principalement à la structure hyperfine de la raie 3,3 ($J = 3, K = 3$) liée au moment quadrupolaire de ^{14}N . L'emploi, soit de la raie 3,2 ($J = 3, K = 2$) de $^{14}\text{NH}_3$, soit de la raie 3,3 de $^{15}\text{NH}_3$, a permis de tourner cette difficulté; cependant il faut environ 100 fois plus de molécules pour utiliser la raie 3,3. Il existe toutefois un effet d'onde progressive résiduel dans la cavité, qui a conduit plusieurs chercheurs à employer des masers à deux jets opposés appliqués à une cavité unique. De nombreuses améliorations de détails ont été apportées aux masers, en particulier sur la forme du gicleur et du focaliseur. Ce dernier organe peut prendre la forme d'électrodes divergentes à partir de la source, ou encore celle d'anneaux ou de fils successifs, à tensions alternées, transversalement au jet. La cavité est habituellement cylindrique; cependant un type plat a été expérimenté.

Jets de césium. — Les résonateurs à jet de césium ont également reçu d'importants perfectionnements; de plus, ils ont donné lieu à des mesures nombreuses et répétées par rapport aux déterminations de temps. Les principales améliorations ont porté sur l'allongement de l'espace d'interaction, l'ajustage de phase des cavités résonnantes, l'uniformité des champs magnétiques continus et la protection contre les champs extérieurs. Certains appareils ont maintenant des espaces d'interaction de 3 à 4 m entre les cavités; la largeur de la raie a pu ainsi être réduite à quelques dizaines de hertz. La sélection de vitesse des atomes améliore ces résultats. Les corrections nécessaires pour tenir compte des diverses influences : champs magnétiques, dissymétrie de la raie fondamentale, des raies voisines, des bandes latérales parasites, accord des cavités, etc., ont été calculées et l'expérience en a vérifié les valeurs. On a pu montrer l'intérêt de ne pas utiliser de champs magnétiques trop faibles. Des recherches ont été poursuivies pour l'emploi de corps autres que le césium, en particulier le rubidium et le thallium. L'intérêt d'avoir ainsi un certain nombre de fréquences échelonnées a été souligné.

En dehors des laboratoires exploitant des résonateurs à jet de césium réalisés à la suite de leurs propres recherches, un certain nombre d'autres laboratoires ont mis en service des exemplaires de l'appareil à oscillateur à quartz asservi construit industriellement par la National Company Inc. sous la dénomination d'Atomichron. Les possibilités d'influence d'un asservissement en ce qui concerne la précision ont été discutées; il semble qu'avec certaines précautions cette méthode ne présente pas d'inconvénients.

Pompage optique. — L'emploi des cellules à vapeur de rubidium ou de césium, avec excitation de la résonance par pompage optique, s'est répandu et de nombreux appareils sont en cours d'étude. Le déplacement de la raie sous l'influence du gaz tampon, de la température et de l'intensité du pompage, semble retirer à cette méthode les caractéristiques de reproductibilité nécessaires à un étalon, malgré ses grandes qualités dans d'autres applications.

Il paraît évident, d'après l'ensemble des renseignements recueillis, que la stabilité à court terme des oscillateurs à quartz servant d'intermédiaires de mesure est actuellement tout juste suffisante et risque de limiter la précision que pourraient fournir les étalons atomiques eux-mêmes. L'emploi de quartz dans l'hélium liquide ou de masers auxiliaires permettrait d'améliorer les résultats. Ce problème deviendrait encore plus important dans le cas d'une éventuelle augmentation importante de la sensibilité des résonances atomiques ou moléculaires.

Étalons en service. — Il est difficile d'établir un état exact et complet des étalons en service régulier et nous n'esquisons ici qu'une vue d'ensemble, certainement incomplète. Une partie seulement des appareils est l'objet de mesures régulières liées aux observations astronomiques et aux comparaisons de fréquence. Il est cependant frappant de constater le développement obtenu depuis 1957. Cette énumération ne peut donner une idée des mérites respectifs des divers appareils, mais elle situe les réalisations en cours.

Allemagne, P. T. B., Braunschweig : Maser expérimental en fonctionnement, avec jet plat, focaliseur à électrodes transversales et cavité rectangulaire. En cours de mise au point : résonateur à jet de césium avec tube en verre scellé.

Australie, Post Office : Maser 3,3 à $^{14}\text{NH}_3$.

Canada, National Research Council, Ottawa : Deux résonateurs à jet de césium en fonctionnement. En cours d'étude : appareil à thallium.

États-Unis. Très nombreux étalons :

Cruft Laboratory (Harvard), Naval Observatory (Washington et Richmond), Naval Research Laboratory (Washington), National Bureau of Standards (Boulder), etc. : Atomichrons, certains en marche permanente.

N. B. S. : Deux résonateurs à jet de césium en fonctionnement (espace d'interaction 55 et 164 cm) ; études très poussées des corrections et comparaisons de haute précision. Études sur le rubidium.

Nombreux appareils expérimentaux : jets de thallium, pompage optique (césium et rubidium), masers.

France, C. N. E. T., Bagnoux : Atomichron en fonctionnement. En cours d'étude : résonateurs à jet de césium et à pompage optique.

Faculté des Sciences de Besançon : Maser expérimental $3,3\ ^{14}\text{NH}_3$.

Grande-Bretagne, N. P. L., Teddington : Deux résonateurs à jet de césium en fonctionnement, dont un de 2,70 m d'espace d'interaction, qui a servi également pour le rubidium.

G. P. O., Dollis Hill : Résonateur à jet de césium.

Italie, Istituto Elettrotecnico Nazionale, Torino : Résonateur à jet de césium en cours d'étude.

Japon, Radio Research Laboratories, Tokyo : Résonateurs à jet de césium et masers (3,3 et 3,2) en fonctionnement.

Observatoire de Tokyo : Deux masers en fonctionnement.

Université de Tokyo : Masers améliorés en cours d'étude.

Suisse, L. S. R. H., Neuchâtel : Deux résonateurs à jet de césium en fonctionnement, dont un de 4 m d'espace entre cavités, avec sélection de vitesse; deux masers simples à $^{15}\text{NH}_3$; deux masers à deux jets opposés à $^{15}\text{NH}_3$. Un appareil à thallium en cours d'étude.

U. R. S. S., Institut d'État des Mesures et Instruments de Mesure, Kharkov : Deux masers (3,3) en fonctionnement. En cours d'étude, emploi des raies 3,2 de $^{14}\text{NH}_3$, 3,3 de $^{15}\text{NH}_3$ et de $^{14}\text{ND}_3$.

Recherches nouvelles. — On a vu dans le paragraphe précédent qu'un certain nombre d'appareils nouveaux sont en cours de mise au point. De plus, de très nombreuses études se poursuivent pour perfectionner encore les méthodes actuelles et pour mettre en œuvre des méthodes nouvelles.

Nous avons cité déjà les masers à deux jets opposés destinés à diminuer les inconvénients de l'effet Doppler résiduel, ainsi que les résonateurs à jet ou à pompage optique employant des corps autres que le césium. Nous pouvons signaler également la combinaison de plusieurs méthodes dans un même ensemble : masers oscillateurs et amplificateurs, jet et pompage optique, par exemple. La méthode du stockage des atomes dans des cellules à parois réfléchissantes, dans le but de prolonger le temps d'interaction, a été essayée pour les jets et aussi pour un maser à hydrogène atomique. Cette dernière méthode permettrait d'accroître de deux ou trois décimales la sensibilité des mesures; cependant il y a lieu de craindre un déplacement des raies sous l'influence des collisions contre les parois, ce qui risquerait d'empêcher cette méthode de fournir de véritables étalons.

COMPARAISONS

Deux méthodes générales de comparaison ont été utilisées :

1. La comparaison directe, dans un même laboratoire, des divers appareils. Elle nécessite, dans le cas d'appareils de laboratoires différents, leur transport matériel.

2. La comparaison indirecte, par mesure simultanée d'une même émission de fréquence étalon par rapport aux différents étalons atomiques.

Comparaison directe. — Peu de laboratoires ont effectué des comparaisons entre étalons locaux. On peut citer surtout le L. S. R. H. qui a comparé un résonateur à jet de césium et un maser à ammoniac $^{15}\text{NH}_3$, ainsi que le N. B. S. et le N.R.C. qui ont chacun comparé deux résonateurs à jet de césium de modèle différent.

Les comparaisons par transport ont été également peu nombreuses, en raison des difficultés qu'elles présentent. La principale opération de ce genre a comporté le transport, des États-Unis jusqu'au N. P. L. en Grande-Bretagne, de deux Atomichrons et d'un tube expérimental. Dans une autre circonstance, un maser a été transporté de Grande-Bretagne en Australie. Enfin, un essai satisfaisant de transport en avion d'un Atomichron en fonctionnement, effectué par le N. B. S., a montré que la fréquence restait constante à 10^{-11} près; cependant, la force de Coriolis peut introduire quelques difficultés. Une telle méthode permettait non seulement de comparer les fréquences, mais aussi les états de garde-temps avec une précision considérable.

L'importance des comparaisons dans un même laboratoire a été soulignée, surtout en ce qui concerne des étalons utilisant des transitions différentes.

Comparaison indirecte à distance. — Les comparaisons les plus importantes et les plus suivies sont effectuées grâce aux émissions de très haute stabilité. Les mesures peuvent porter sur la fréquence même de ces émissions, ou sur les signaux horaires qu'elles transmettent.

Avec les signaux horaires, il est possible de comparer les temps atomiques intégrés, même dans le cas où le laboratoire récepteur ne possède pas lui-même d'étalon atomique. Étant donné l'influence des constantes de temps des circuits émetteurs et récepteurs, le début des signaux, phénomène transitoire, ne peut être défini avec précision que si la fréquence de l'onde est suffisamment élevée. Sa détermination est donc, en principe, très précise sur ondes décamétriques et encore suffisante sur ondes kilométriques.

En réalité, les perturbations dues à la propagation des ondes décamétriques introduisent des erreurs appréciables; d'autre part, les signaux horaires sur ondes kilométriques ne sont utilisables que pour des portées limitées à quelques milliers de kilomètres. La précision du temps atomique intégré peut être excellente; mais celle des déterminations de signaux horaires ne dépasse le dix-millième de seconde que dans d'excellentes conditions, ce qui nécessite d'étaler les mesures sur plusieurs mois.

La mesure de la fréquence des émissions n'est utilisable pour les ondes décamétriques qu'à condition de prendre des moyennes mensuelles, pour compenser les effets de la propagation. Les ondes myriamétriques, moins sujettes à ces effets, se prêtent à d'excellentes comparaisons, par évaluation du glissement dans le temps du déphasage entre l'onde reçue et l'étalon local. Cette évaluation peut découler de l'observation intermittente du déphasage à l'oscillographe cathodique, ou de préférence de son enregistrement continu, soit par inscription d'un phasemètre à servomécanisme, soit par photographie d'un oscillogramme; cette dernière méthode est souvent considérée comme la meilleure.

Il existe désormais plusieurs stations très stables, principalement Rugby GBR 16 kHz, Panama NBA 18 kHz, Boulder WWVL 20 kHz, Prague OMA 50 kHz, Rugby MSF et Boulder WWVB 60 kHz, Mainflingen DCF 77 77,5 kHz, fonctionnant de façon prolongée ou même permanente. Il est donc facile d'opérer dans d'excellentes conditions. A titre d'exemple la stabilité de NBA a été estimée à $\pm 5 \times 10^{-11}$ près. Avec les divers procédés de mesure, il est possible d'apprécier en local une fraction de microseconde, ce qui en 24 heures donnerait une sensibilité dépassant 10^{-11} si la propagation n'introduisait pas des perturbations dans l'évolution de la phase. Cette évolution consiste d'abord dans une variation périodique entre la nuit et le jour, fonction de la distance; au-delà de 2 000 à 3 000 km, cette évolution peut être grossièrement évaluée à 7 ou 8 μ s par 1 000 km, pour 16 et 18 kHz. Naturellement au lever et au coucher du soleil des phénomènes transitoires se manifestent, pendant plusieurs heures lorsqu'il y a une grande différence de longitude entre les stations. A ces variations régulières se superposent des variations irrégulières dues aux perturbations ionosphériques, aux traînées de météorites, etc. Néanmoins, en prenant les extrémités des intervalles de 24 heures dans les périodes les moins perturbées, on obtient des résultats dont l'écart d'un jour à l'autre reste inférieur à quelques 10^{-10} ; en 1960, l'U. R. S. I. a recommandé de choisir les intervalles de 15 h à 15 h T. U. Les écarts journaliers se réduisent lorsque la stabilité de l'oscillateur local de référence est meilleure. Il n'est pas sûr cependant que la compensation dans la moyenne soit absolument rigoureuse. En répartissant les

écarts sur des durées de l'ordre du mois, les erreurs expérimentales s'abaissent à la décimale suivante. C'est ce que montre en particulier la comparaison, entre les divers laboratoires, des mesures de différence entre GBR et NBA, ainsi que l'a suggéré W. Markowitz.

L'U. R. S. I. a recommandé, à la suite du Comité Consultatif International des Radiocommunications, que la fréquence des émissions étalons soit maintenue aussi constante que possible, mais choisie de telle sorte que les signaux horaires suivent approximativement le temps T. U. 2. La quantité dont cette fréquence doit différer de celle qui serait rattachée à la fréquence du césium est définie par le Bureau International de l'Heure pour chaque année. Signalons qu'une opération de synchronisation des émissions de fréquences étalons britanniques et américaines, aussi bien pour leur fréquence à $\pm 10^{-10}$ près que pour l'état de leurs signaux horaires à ± 1 ms près, est en cours.

Enfin, il y a lieu de remarquer que la précision des comparaisons à distance, suffisante pour la précision des étalons actuellement en service, ne le serait plus si celle-ci était améliorée, ou si des étalons nouveaux étaient mis au point. Il faudrait alors envisager de nouvelles méthodes.

RÉSULTATS OBTENUS

Les comparaisons faites dans un même laboratoire entre divers étalons ont fourni des renseignements sur leur reproductibilité, leur stabilité et leur exactitude par rapport à la raie choisie. A titre d'exemple, nous citerons les résultats obtenus au L.S.R.H. sur les jets de césium et sur les masers à $^{15}\text{NH}_3$ avec jet simple ou double :

	NH_3 simple	NH_3 double	Cs
Reproductibilité.....	3×10^{-11}	2×10^{-11}	2×10^{-11}
Stabilité.....	3×10^{-11}	5×10^{-12}	2×10^{-11}
Exactitude.....	quelques 10^{-10}	meilleure que 10^{-10}	10^{-10}

La stabilité à court terme des masers semble meilleure que celle des jets de césium, mais ce pourrait être l'inverse pour la stabilité à long terme.

Au N. P. L., la comparaison d'Atomichrons au résonateur à césium a montré un désaccord de l'ordre de 2×10^{-10} .

Au N. B. S., la comparaison des deux résonateurs à césium a montré que les diverses corrections atteignaient au total environ $\pm 1 \times 10^{-11}$; l'écart entre les deux appareils était de $1,6 \times 10^{-11}$.

Les comparaisons à grande distance, grâce aux émissions de fréquences étalons, ont été particulièrement nombreuses

depuis 1960. Les statistiques établies en particulier au N. B. S., au Naval Observatory et au C. N. E. T., indiquent un écart probable mensuel de 1 à 2×10^{-10} entre les étalons; les écarts probables entre les mesures journalières peuvent atteindre 2 à 3×10^{-10} . Certaines différences à allure systématique, d'un laboratoire à l'autre, peuvent provenir en partie des corrections qui sont appliquées aux mesures réelles pour reconstituer la fréquence admise. En particulier, la valeur de la correction appliquée à la fréquence fournie par les Atomichrons n'est pas toujours choisie d'une façon uniforme.

INTÉGRATION DU TEMPS ATOMIQUE

Pour définir la seconde en fonction d'un étalon atomique de fréquence, il faut passer de la fréquence à un temps, donc intégrer les intervalles de temps constitués par les périodes d'une horloge à quartz comparée à l'étalon atomique. Cette comparaison peut se faire à des intervalles plus ou moins espacés; en pratique, selon les laboratoires ou observatoires qui se livrent à des intégrations, et suivant la stabilité et la précision des divers appareils en jeu, l'intervalle va de quelques heures à quelques semaines. En général, on admet une interpolation linéaire de la marche de l'horloge à quartz entre deux comparaisons; il y a intérêt à opérer avec plusieurs horloges à quartz. Il serait également utile de multiplier les étalons atomiques dont on intègre le temps, pour assurer la continuité en cas d'arrêt, soit d'étalons, soit d'émissions servant à la comparaison.

Les méthodes d'intégration présentent pour le moment certaines différences et devraient être normalisées. La précision obtenue s'améliore d'année en année en raison de l'augmentation du nombre des étalons entrant dans la moyenne et du perfectionnement des comparaisons. A l'heure actuelle, au moins cinq observatoires ou laboratoires intègrent le temps atomique, et le nombre d'étalons utilisés approche de la dizaine. L'écart moyen des étalons par rapport à leur moyenne était, de 1958 à 1960, de l'ordre de $0,5 \times 10^{-10}$, ce qui donne pour le temps intégré au bout de ces deux années un écart de 3 ms.

DÉTERMINATION DE LA SECONDE DE TEMPS DES ÉPHÉMÉRIDES

Il est évident que la précision avec laquelle on peut exprimer la fréquence d'un étalon atomique en fonction de la seconde de Temps des Éphémérides dépend finalement de la précision avec

laquelle cette seconde est connue. Dans la détermination du Temps des Éphémérides interviennent principalement des erreurs d'observation et des erreurs sur les éphémérides. En fait, les observations sont effectuées par rapport à la Lune. Les erreurs d'observation dépendent de la méthode utilisée, caméra lunaire ou occultations. Les corrections de bord, ainsi que la détermination du centre lunaire, ont été améliorées.

Les éphémérides ont reçu également des améliorations; la théorie de Brown sur le mouvement de la Lune est en cours de révision. Il est nécessaire de mieux connaître les positions de la Lune et du Soleil, en particulier pour rapporter les observations actuelles aux positions correspondant à la date de définition de la seconde de Temps des Éphémérides. Plusieurs années seront encore nécessaires pour cela.

Une première détermination de la fréquence de résonance du césium pour le champ nul, par rapport à la seconde de Temps des Éphémérides, a été effectuée en 1958 par Markowitz, Hall, Essen et Parry. La valeur obtenue était de $9\ 192\ 631\ 770 \pm 20$ Hz pour 1957,0. Des déterminations récentes n'ont pas conduit à modifier cette valeur. On estime ainsi qu'une précision de 2 à 3×10^{-9} pourra être obtenue, avant la prochaine Conférence Générale des Poids et Mesures, pour l'expression d'une seconde de temps atomique en fonction de la seconde de Temps des Éphémérides. Il n'est pas absolument certain que le temps gravitationnel et le temps atomique soient reliés de façon rigide.

CONCLUSIONS

Les travaux du Comité Consultatif ont abouti à l'adoption des trois recommandations suivantes, qui en résument les conclusions :

RECOMMANDATION 1

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

CONSTATANT avec satisfaction que l'exactitude des étalons atomiques de fréquence s'est améliorée jusqu'à environ $\pm 1 \times 10^{-10}$, mais reconnaissant cependant que des améliorations des dispositifs en service sont encore possibles et que des dispositifs imaginés récemment paraissent susceptibles d'une exactitude égale ou meilleure,

RECOMMANDE que l'on poursuive l'étude de ces étalons en vue d'obtenir leur fréquence affranchie de toute influence perturbatrice.

RECOMMANDATION 2

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,
ayant pris connaissance des comparaisons d'étalons atomiques
de fréquence effectuées et des résultats obtenus, et considérant que
ces comparaisons permettent d'étudier la stabilité et l'exactitude de
ces étalons,

RECOMMANDE que soient poursuivies et étendues les comparaisons
des fréquences et des échelles de temps déterminées par des étalons
de modèles aussi différents que possible, soit par voie radioélectrique,
soit par des expériences en un même laboratoire,

et RECOMMANDE que les résultats de ces comparaisons soient
portés rapidement à la connaissance de tous les laboratoires intéressés.

RECOMMANDATION 3

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,
CONSIDÉRANT que la précision avec laquelle peut être déterminée
la seconde des Éphémérides est inférieure à la précision que per-
mettrait l'emploi d'étalons atomiques,

RECOMMANDE aux Laboratoires de pousser leurs recherches sur
les étalons atomiques de fréquence assez activement pour qu'une
nouvelle définition de l'unité de temps puisse être soumise à la
Douzième Conférence Générale des Poids et Mesures.

(Bagneux, 19 juin 1961)

LE MASER A HYDROGÈNE ATOMIQUE

Par N. F. RAMSEY

Physics Department, Harvard University,
Cambridge, Mass., U. S. A.

(Traduction)

Les premières expériences relatives à un maser à hydrogène atomique ont été décrites dans une note récemment publiée ⁽¹⁾. Dans ce montage, les atomes d'hydrogène dans l'état supérieur d'énergie de structure hyperfine sont confinés pendant une seconde environ dans un récipient en quartz. Ce récipient, dont la surface est recouverte d'un revêtement spécial, est pourvu d'un petit orifice d'entrée et est continuellement rempli par l'arrivée des atomes d'hydrogène; il est entouré par une cavité argentée, accordée sur la fréquence de structure hyperfine de l'hydrogène. Ce montage fonctionne aisément comme maser auto-oscillant, la source d'énergie étant l'énergie de structure hyperfine des atomes continuellement introduits dans le récipient en quartz. Un tel oscillateur a de nombreux avantages, notamment :

- a. le temps de confinement est long, ce qui rend possibles des raies de résonance intrinsèquement très étroites;
- b. le spectre de l'atome d'hydrogène est particulièrement simple;
- c. le montage possède les caractéristiques avantageuses du maser comme amplificateur à faible bruit;
- d. le montage fonctionne de façon particulièrement commode.

Jusqu'ici un seul maser à hydrogène a été réalisé. Jusqu'à ce que le second maser à hydrogène soit construit, il sera impossible de déterminer expérimentalement le gain en stabilité et en reproductibilité obtenu avec ce maser par rapport aux autres

⁽¹⁾ GOLDENBERG (H. M.), KLEPPNER (D.) et RAMSEY (N. F.), *Phys. Rev. Letters*, 1960, 5, p. 361.

étalons de fréquence existants. Nous construisons toutefois un second maser à hydrogène et nous espérons pouvoir dans les prochains mois déterminer la stabilité de ces premiers montages de maser à hydrogène par des comparaisons entre eux.

Les seules mesures de stabilité ont jusqu'ici été effectuées par comparaison entre le premier maser à hydrogène et un ancien Atomichron qui était le meilleur étalon de fréquence facilement disponible au laboratoire. Les instabilités relevées au cours de cette comparaison n'étaient pas supérieures à celles qui pouvaient être attribuées à l'Atomichron utilisé.

Jusqu'à ce que la construction du second maser soit terminée, il ne sera pas possible d'établir la reproductibilité et la stabilité du maser à hydrogène atomique. Cependant, des calculs théoriques montrent qu'une stabilité atteignant 10^{-13} , et peut-être 10^{-15} , ne serait pas invraisemblable. Toutefois, on ne peut avoir entière confiance dans ces calculs en raison de la difficulté d'estimer les perturbations pouvant être introduites par les collisions entre les atomes et les parois du récipient. Dès que les deux montages seront en fonctionnement, on pourra déterminer expérimentalement l'effet de paroi par comparaison des fréquences obtenues avec des récipients en quartz de différentes dimensions. Jusqu'ici on n'a observé aucune variation de fréquence suivant les dimensions du récipient.

A l'heure actuelle, le matériau le mieux approprié comme revêtement du récipient en quartz est le diméthylchlorosilane (Dri-Film, produit par la General Electric). Toutefois, aucune bonne comparaison n'est possible entre les revêtements qui conviendraient tant que les effets de paroi n'auront pas été observés.

Si le maser à hydrogène atomique est bien meilleur que les autres étalons de fréquence possibles, ainsi qu'il apparaît maintenant, il sera aisé de le montrer avant 1966, date proposée pour l'adoption d'une nouvelle définition de la seconde. A ce moment, il devrait être possible de spécifier pour l'étalon une forme bonne et reproductible. Mais il est moins sûr que la meilleure forme puisse être spécifiée assez tôt pour son adoption à cette date.

(4 avril 1961)

ANNEXE 2

U. S. Naval Observatory (États-Unis d'Amérique)

DÉFINITION, DÉTERMINATION ET CONSERVATION DE LA SECONDE

Par W. MARKOWITZ

(Traduction)

Résumé. — *a.* Une détermination de la fréquence du césium a donné la valeur $9\ 192\ 631\ 770 \pm 20$ Hz.

b. Des comparaisons internationales d'oscillateurs à césium au moyen de transmissions en ondes myriamétriques montrent que divers oscillateurs à césium concordent à environ 10^{-10} près.

c. Les comparaisons entre oscillateurs peuvent être effectuées avec une précision de 2×10^{-11} pour un intervalle de 24 heures.

d. Actuellement, le meilleur choix que l'on puisse faire pour définir la seconde de temps atomique semble être celui du césium. Il est possible que le maser à hydrogène permette un choix meilleur.

1. En 1956, le Comité International des Poids et Mesures a défini la seconde, unité d'intervalle de temps, comme suit :

« La seconde est la fraction $1/31\ 556\ 925,974\ 7$ de l'année tropique pour 1900, janvier 0 à 12 h de Temps des Éphémérides ».

La seconde ainsi définie est identique à la seconde de Temps des Éphémérides, elle-même définie par le mouvement du Soleil.

Le Temps des Éphémérides (T. E.) peut être obtenu directement à partir du Soleil ou indirectement à partir de la Lune. L'exactitude obtenue dépend :

- a.* de l'exactitude des observations;
- b.* de l'exactitude de l'éphéméride utilisée.

Pour de longues périodes, disons 100 années ou davantage, le T. E. est fourni avec la meilleure exactitude par le Soleil; pour de courtes périodes, par la Lune. Pour la période qui a commencé

en juin 1955 lorsque fut construit le premier oscillateur atomique précis, c'est la Lune qui fournit la meilleure exactitude.

2. En 1955, l'Union Astronomique Internationale a recommandé d'utiliser l'Éphéméride Lunaire Améliorée pour la détermination de la seconde de T. E. Cette recommandation a été suivie par le National Physical Laboratory (Teddington) et le U. S. Naval Observatory (Washington) dans une expérience commune pour déterminer la fréquence du césium en fonction de la seconde (de T. E.). Dans cette expérience on a employé au N. P. L. l'oscillateur atomique à jet de césium, désigné par Cs 1, et la caméra lunaire au Naval Observatory [1]. La fréquence obtenue est

$$(1) \quad \nu = 9\,192\,631\,770 \pm 20 \text{ Hz en } 1957,0$$

Le U. S. Naval Observatory a établi un système de temps atomique, A₁, fondé sur la fréquence du césium supposée égale à 9 192 631 770 Hz et décrit dans Time Service Notice N° 6. A₁ fut fondé sur l'oscillateur à césium du N. P. L. de juin 1955 à septembre 1956 et sur ceux du Naval Research Laboratory (Washington) de septembre 1956 à janvier 1960. Il est maintenant fondé sur neuf oscillateurs atomiques qui se trouvent dans divers pays.

3. La Conférence Générale des Poids et Mesures recommanda en 1960 de considérer, en vue de son adoption en 1966, une définition de l'intervalle de temps fondée sur une transition quantique atomique (ou moléculaire). Deux questions doivent être prises en considération :

- a. Quelle transition quantique utiliserait-on ?
- b. A combien près sa fréquence sera-t-elle déterminée en fonction de la seconde de T. E. ?

Si un choix devait être effectué aujourd'hui, la réponse à la première question serait sans doute le jet de césium. Des comparaisons externes, décrites ci-dessous, indiquent que l'on peut employer un oscillateur à césium à un seul jet pour définir une échelle d'intervalles de temps avec une précision de 10^{-10} . Quelques comparaisons internes ont donné des précisions meilleures, mais non encore confirmées par des comparaisons internationales; toutefois, une précision de 10^{-11} semble probable dans l'avenir.

Le maser à ammoniac et les cellules à gaz ont été employés comme source de fréquence constante. La fréquence obtenue varie toutefois selon la construction, plus que pour le jet de césium.

Le maser à hydrogène étudié par N. F. Ramsey peut constituer un étalon de très haute précision; Ramsey estime pouvoir atteindre

une précision de 10^{-13} à 10^{-15} . Des expériences sont en cours à Harvard et les possibilités du maser à hydrogène seront connues vers 1964.

4. L'erreur probable de détermination de la seconde, pour autant qu'elle concerne la technique de la caméra lunaire, est d'environ 1×10^{-9} . L'erreur probable due aux éphémérides lunaires, qui fut discutée à la première session du Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde en 1957, sera envisagée plus loin. L'incertitude de l'Éphéméride Lunaire Améliorée est due :

- a. aux erreurs sur les termes à courte période (18,6 ans ou moins);
- b. aux termes planétaires (à longue période);
- c. au terme introduit par le couple de freinage par les marées.

Le terme de période 18,6 ans est dû à la différence entre la valeur de l'aplatissement de la Terre utilisée par E. W. Brown dans sa théorie de la Lune et les valeurs modernes. La valeur donnée dans l'équation (1) serait modifiée d'environ $1,5 \times 10^{-9}$ si l'Union Astronomique Internationale recommandait une modification dans l'Éphéméride Lunaire tenant compte de la valeur corrigée de l'aplatissement.

On peut toutefois se poser la question de savoir s'il serait vraiment avantageux d'effectuer des modifications de détail dans l'Éphéméride Lunaire. L'élaboration d'une nouvelle théorie de la Lune avec l'aide d'un calculateur électronique est actuellement en cours.

L'Éphéméride Lunaire Améliorée contient un terme βT^2 , où T est le temps en siècles depuis 1900,0, qui permet de représenter l'action sur le mouvement orbital de la Lune du couple dû aux marées. La valeur adoptée pour β est $11'',22$. Soit γ l'erreur sur la valeur admise. La longitude moyenne de la Lune s'accroît de $1'',73 \times 10^9$ par siècle. Ainsi γ entraîne sur la seconde de T. E. déduite du mouvement de la Lune l'erreur

$$(2) \quad 2\gamma T/1,73 \times 10^9 = 1,2 \times 10^{-9} \gamma T.$$

La modification d'échelle du T. E. déduit de la Lune est $1,2 \gamma \times 10^{-11}$ par année. La modification totale en 1960 est $7,2 \gamma \times 10^{-10}$. Nous ne connaissons pas la valeur à attribuer à γ . Si l'on prend $3''$, cette erreur sur β entraîne pour l'échelle de T. E. une erreur de 2×10^{-9} en 1960.

On estime que la précision avec laquelle une unité de temps atomique pourra en 1966 être reliée à la seconde définie en 1956, sera d'environ 3×10^{-9} . On peut remarquer que cette précision

est supérieure à celle avec laquelle l'unité de longueur définie à l'aide du krypton 86 fut reliée au Prototype du mètre.

5. Il se peut que la seconde de T. E. ne soit pas reliée à la seconde de temps atomique (T. A.) par une seule constante. S'il existe une dérive séculaire cosmique de 10^{-10} par an entre les échelles du « temps gravitationnel » et du temps atomique, le rapport de la seconde de T. E. à la seconde de T. A. a varié de 6×10^{-9} depuis 1900. Une variation séculaire, si elle existe, aurait d'importantes conséquences cosmologiques, mais n'entraînerait aucune difficulté pratique dans la conservation du temps.

6. On a immédiatement besoin, dans des buts civils et techniques, de certaines données liées à la date et à l'intervalle de temps; d'autres ont une importance surtout scientifique, mais elles ne sont pas indispensables dès maintenant.

Les mesures physiques se référeront à la seconde de T. A. quand la précision désirée l'exigera.

La seconde de T. E. n'est pas utilisée comme telle en astronomie. C'est la date exprimée en T. E. qui est importante pour les recherches sur les mouvements des planètes et des satellites, mais on ne l'exige pas immédiatement.

La seconde de temps solaire moyen, c'est-à-dire de Temps Universel (T. U.), n'a pas besoin d'être connue immédiatement. Son utilisation principale, et peut-être unique, est de fournir, par comparaison avec la seconde de T. E. ou de T. A., la vitesse de rotation de la Terre.

Toutefois, on a immédiatement besoin de la date exprimée en T. U. pour la navigation et la géodésie, pour suivre les satellites et pour certaines autres applications où l'on doit connaître la position de la Terre dans sa rotation autour de son axe. Le Temps Universel est la base légale du Temps normalisé. Ainsi on a un besoin immédiat de la date en T. U. et de la seconde de T. A. Plusieurs transmissions radio les fournissent simultanément.

7. La comparaison internationale des oscillateurs atomiques est réalisée au mieux par l'observation de la variation de phase en 24 heures d'émissions radio en ondes myriamétriques. Des expériences faites pendant des années à l'aide de l'émetteur GBR (Rugby) sur 16 kHz ont montré les avantages de ces ondes pour les comparaisons de fréquence.

En décembre 1959, la U. S. Naval Radio Station NBA, Zone du Canal, commençait des émissions sur 18 kHz. Ces émissions sont continues depuis juillet 1960, sauf pendant une unique période hebdomadaire d'entretien. La fréquence de NBA a été maintenue presque constante avec une stabilité, d'un jour à l'autre, de 5×10^{-11} environ. Cette stabilité rend la station NBA

particulièrement utile pour comparer la fréquence des oscillateurs atomiques et pour étudier les erreurs de comparaison de fréquence. Des résultats détaillés ont été donnés dans deux rapports de W. Markowitz et R. G. Hall [2], [3]; en voici le résumé.

La ligne *a* du tableau A donne la fréquence moyenne de NBA pour chaque mois dans le système A₁. Les autres lignes donnent les écarts de fréquence des divers oscillateurs atomiques. Le signe plus signifie que la fréquence était plus élevée que la moyenne du système complet.

TABLEAU A

Moyenne mensuelle de la fréquence de NBA
et écarts des oscillateurs atomiques

Unité = 1×10^{-10}

	1960			1961		Moyenne
	Sept.	Oct.	Déc.	Jan.	Fév.	
<i>a.</i> NBA en A ₁	-149,6	-149,5	-150,9	-150,8	-150,6	-150,3
1. Naval Obs., Washington.....	- 0,1	- 0,1	- 1,7	- 1,9	- 1,7	- 1,1
2. Naval Research Lab.....	- 0,4	+ 0,2	- 0,5	- 0,6	- 1,0	- 0,5
3. Richmond.....	+ 0,9	+ 0,4	-	+ 0,7	+ 1,0	+ 0,8
4. Cruft *.....	+ 1,1	+ 2,4	+ 3,2	+ 3,1	+ 2,6	+ 2,5
5. Bagneux.....	- 1,5	- 1,5	0,0	- 1,4	-	- 1,1
6. National Physical Lab.....	0,0	- 1,3	+ 1,5	+ 0,9	- 0,1	+ 0,2
7. Neuchâtel **.....	+ 1,6	+ 2,3	+ 1,5	+ 0,2	+ 1,2	+ 1,4
8. National Bureau of Standards, Boulder.....	-	-	-	+ 1,7 *	+ 1,8	+ 1,8
9. National Research Council, Ottawa.	-	-	-	- 0,3 *	- 0,7 (^a)	- 0,5

Notes. — Les oscillateurs atomiques sont des jets de césium, sauf le N° 7.

* Ajouter +0,5 à ces valeurs de Cruft pour obtenir les valeurs indiquées. Voir la référence [2], section 3.

** Ces valeurs, fondées sur un maser à ammoniac, n'ont pas été utilisées dans l'établissement du système A₁, mais les valeurs quotidiennes ont été utilisées pour obtenir la fréquence de NBA.

(^a) Par l'intermédiaire de GBR.

Le tableau A montre que la fréquence d'un oscillateur atomique isolé a un écart d'environ 10^{-10} par rapport à la moyenne et que sa stabilité d'un mois à l'autre est d'environ 5×10^{-11} . La stabilité d'un mois à l'autre du système A₁ est d'environ 2×10^{-11} .

Le tableau B donne un résumé des erreurs probables E_1 des écarts résiduels d'un oscillateur par rapport à la moyenne du jour; E_1 est pratiquement l'erreur probable sur le réglage de NBA pendant une durée de 24 h. L'erreur moyenne dans la comparaison des fréquences pendant 24 heures est 6×10^{-11} . Une analyse montre que les variations des conditions de propagation interviennent seulement pour environ 2×10^{-11} . Il serait possible d'utiliser les ondes myriamétriques pour faire des comparaisons à 10^{-12} près en les faisant porter sur des intervalles de plusieurs semaines.

TABLEAU B

Erreurs probables des écarts résiduels d'une détermination de la fréquence de NBA sur 24 h

Unité = 1×10^{-10}

	1960			1961		Moyenne
	Sept.	Oct.	Déc.	Jan.	Fév.	
Naval Observatory.....	0,60	0,80	0,41	0,62	0,59	0,60
Naval Research Laboratory.....	0,51	0,42	0,37	0,88	0,61	0,56
Richmond.....	0,77	1,14	*	0,29	0,44	0,66
Cruft.....	0,34	0,50	0,48	0,65	0,31	0,46
Bagneux.....	0,65	0,74	0,89	1,01	**	0,82
National Physical Laboratory.....	0,91	0,65	0,62	0,63	0,53	0,67
Neuchâtel.....	0,57	0,51	0,60	0,38	0,37	0,49
National Bureau of Standards.....	—	—	—	—	0,96	0,96
Moyenne.....	0,62	0,68	0,56	0,64	0,54	

Notes :

* Oscillateur à quartz de référence en réparation.

** Matériel enlevé temporairement.

8. L'émetteur GBR a aussi été utilisé pour des comparaisons entre oscillateurs atomiques, mais on doit employer une méthode d'analyse différente en raison des plus grandes variations de fréquence pendant chaque mois.

Soit $\Delta f = (\text{NBA}) - (\text{GBR})$ la différence des fréquences, telle qu'elle est mesurée le même jour à une station de réception; Δf est alors indépendant des variations de fréquence de l'oscillateur atomique et de l'oscillateur à quartz locaux, et on devrait obtenir, le même jour, la même valeur à toutes les stations.

Soit K la différence entre les Δf obtenus au Naval Observatory et à une autre station, le même jour. Le tableau C donne les valeurs moyennes de K . De la ligne (7) on déduit la ligne (8) qui donne la différence entre le Δf observé à chaque station et la moyenne de tous les Δf . Dans la limite des erreurs d'observation, environ 10^{-11} , il n'y a pas de différence systématique

TABLEAU C

Différences de fréquence, K

$$\Delta f_{\text{station}} = (\text{NBA} - \text{GBR})$$

$$K = \Delta f_{\text{Nav. Obs.}} - \Delta f_{\text{station}}$$

$$\text{Unité} = 1 \times 10^{-10}$$

	Nav. Obs.	Cruft	N. P. L.	Neuchâtel
1 1960 Août.....	0,0	+0,3 (10)	=	-1,0 (5)
2 Sept.....	0,0	+0,1 (16)	-	+0,2 (19)
3 Oct.....	0,0	0,0 (9)	+0,2 (12)	-0,1 (15)
4 Déc.....	0,0	+0,5 (11)	+0,6 (4)	+1,3 (11)
5 1961 Janv.....	0,0	0,0 (15)	0,0 (8)	+0,1 (24)
6 Fév.....	0,0	+0,3 (14)	+0,2 (15)	+0,3 (17)
7 Moyenne.....	0,0	+0,20	+0,25	+0,13
8 $\Delta f_{\text{station}} - \Delta f_{\text{m.}}$	+0,14	-0,06	-0,11	+0,01

Le nombre de jours d'observations est donné entre parenthèses.

entre les comparaisons de fréquence faites par l'intermédiaire de NBA ou de GBR. Ainsi, cette comparaison ne permet de déceler aucune anomalie liée à la direction de propagation, d'est en ouest ou d'ouest en est.

(27 mars 1961)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MARKOWITZ (W.), HALL (R. G.), ESSEN (L.) et PARRY (J. V. L.), Frequency of cesium in terms of Ephemeris Time, *Phys. Rev. Letters*, 1958, 1, p. 105.
- [2] MARKOWITZ (W.) et HALL (R. G.), Frequency control of NBA on an International System, I, U. S. Naval Observatory, 12 January 1961.
- [3] MARKOWITZ (W.) et HALL (R. G.), Frequency control of NBA on an International System, II, U. S. Naval Observatory, 30 March 1961.

ANNEXE 3

U. S. Naval Observatory (États-Unis d'Amérique)

LA FRÉQUENCE DU CÉSIIUM DÉDUITE D'OBSERVATIONS RÉCENTES AVEC LA CAMÉRA LUNAIRE

Par W. MARKOWITZ et R. G. HALL

(Traduction)

Résumé. — Les observations faites avec la caméra lunaire de 1957,0 à 1960,5 indiquent que pour reproduire la seconde on peut continuer à utiliser la fréquence de 9 192 631 770 Hz admise pour le césium.

La fréquence du césium [1] précédemment obtenue, 9 192 631 770 \pm 20 Hz, était fondée sur des observations faites au moyen de la caméra lunaire (dual-rate moon position camera) au U. S. Naval Observatory de 1954,0 à 1958,5. Elle était obtenue en déterminant séparément la relation entre le Temps Universel (T. U.) et le Temps Atomique (T. A.) d'une part, et entre le T. U. et le Temps des Éphémérides (T. E.) d'autre part. Jusqu'à 1955,4 l'oscillateur à jet de césium du National Physical Laboratory (Teddington) n'était pas encore en fonctionnement et la relation entre le T. U. et le T. A. fut, en ce qui concerne la période de 1954,25 à 1955,4, obtenue par extrapolation afin de donner plus de poids au résultat. Toutefois, le T. U. n'intervient pas dans la détermination de la fréquence du césium et nous pouvons relier directement le T. E. au T. A. La méthode de calcul est la suivante :

Soit

$$\Delta T = T. E. - T. U.,$$

$$\Delta A = T. A. - T. U.,$$

$$H = \Delta T - \Delta A = T. E. - T. A.$$

H est ainsi indépendant de toute erreur de détermination du T. U. tant que l'on utilise la même valeur du T. U. dans les deux premières équations.

Soit $\nu_0 = 9\ 192\ 631\ 770$ Hz la fréquence du césium admise dans le système A₁, ν la valeur exacte et $\nu = \nu_0 + \Delta\nu$. En admettant l'absence de toute dérive cosmique des échelles de temps gravitationnel et atomique, nous avons

$$H = a + bt,$$

où a et b sont des constantes.

On peut montrer que $\Delta\nu = -291\ b$, où $\Delta\nu$ est exprimé en hertz lorsque b est exprimé en secondes de temps par année.

Le tableau I donne les valeurs observées de ΔT et de ΔA , et les valeurs de H qui en sont déduites. Le T. U. qui intervient dans ΔT et ΔA est le même; c'est celui du Naval Observatory.

TABLEAU I
Comparaison de T. E. et de A 1

Époque moyenne	T. E.-T. U. (s)	A 1-T. U. (s)	T. E.-A 1 (s)
1952,75	+28,86		
53,25	30,07		
,75	30,28		
54,25	30,22		
,75	29,62		
55,25	29,97		
,75	30,10	-0,92	+31,02
56,25	30,12	-0,76	30,88
,75	29,65	-0,59	30,24
57,25	30,70	-0,40	31,10
,75	31,50	-0,15	31,65
58,25	31,29	+0,13	31,16
,75	31,76	+0,38	31,38
59,25	32,00	+0,61	31,39
,75	32,01	+0,85	31,16
60,25	32,39	+1,09	31,30

Les valeurs des moyennes semestrielles de ΔT de 1952,75 à 1958,25 ont déjà été publiées [2]. Les valeurs données ici résultent de nouvelles mesures faites sur d'anciens clichés et de mesures faites sur des clichés supplémentaires, pour la même période. Ainsi, les corrections systématiques précédemment appliquées ne l'ont pas été ici. Toutefois, toutes les observations de 1952,75 à 1960,25 données dans le tableau I ont été exploitées de façon homogène.

Les valeurs de ΔT sont fondées sur l'Éphéméride Lunaire Améliorée et les Yale Zone Catalogues. On n'a pas appliqué de corrections systématiques aux positions de la Lune et des étoiles données dans les tables. Les moyennes par lunaison ont été faites en attribuant le même poids aux moyennes correspondant aux périodes suivantes :

- a. l'âge de la Lune est inférieur à 13,0 jours;
- b. il est compris entre 13,0 et 16,0 jours;
- c. il est supérieur à 16,0 jours.

Les corrections de bord n'ont pas été appliquées, bien que nous considérons qu'elles soient essentielles pour une exploitation définitive.

Les valeurs de H sont presque constantes depuis 1957,25. Ceci peut être dû aux améliorations apportées cette année-là à la caméra lunaire. La méthode des moindres carrés pour la période 1957,25 à 1960,25 donne $b = -0,011$ s par an, de sorte que $\Delta\nu = +3$ Hz. L'erreur probable est ± 20 Hz.

(4 avril 1961)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MARKOWITZ (W.), HALL (R. G.), ESSEN (L.) et PARRY (J. V. L.), Frequency of cesium in terms of Ephemeris Time, *Phys. Rev. Letters*, 1958, 1, p. 105.
- [2] MARKOWITZ (W.), *Astr. J.*, 1959, 64, p. 106.

ANNEXE 4

U. S. Naval Observatory (États-Unis d'Amérique)

LETTRE DE G. M. CLEMENCE

(Traduction)

Dans la correspondance échangée avec nous, D. H. Sadler a fait une suggestion d'une telle importance pour l'avenir qu'elle pourra, je l'espère, être discutée à la session d'avril du Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde. S'il est normal de procéder ainsi, je demande que cette lettre soit soumise au Comité.

En substance, l'idée de D. H. Sadler est de définir une unité physique de fréquence par rapport à une transition atomique ou moléculaire spécifiée, dans des conditions définies. Dans ce qui suit, je me réfère au césium et au nombre $9\ 192\ 631\ 770$, mais je le fais uniquement pour fixer les idées et je ne recommande ni un élément particulier, ni un nombre particulier, comme devant constituer nécessairement une partie de la définition à adopter en définitive. Avec ces réserves, la définition pourrait prendre l'une des formes suivantes :

1. L'unité de fréquence est le hertz, $1/9\ 192\ 631\ 770$ de la fréquence du césium;
2. L'unité de fréquence est telle que la fréquence du césium soit $9\ 192\ 631\ 770$ hertz;
3. Le hertz est $1/9\ 192\ 631\ 770$ de la fréquence du césium.

D'autres formes pourraient être aussi bonnes. Elles sont toutes équivalentes et ne diffèrent que par leur libellé.

L'avantage d'une telle définition est qu'il devient alors possible d'éviter l'usage pratique de deux sortes de seconde.

Il est clair que les secondes marquées par une horloge atomique ne sont pas identiques à celles marquées par une horloge qui garde le Temps des Éphémérides. Elles peuvent concorder à 10^{-9} près, ou mieux, mais elles ne sont pas identiques et l'on n'a même aucun moyen d'être sûr que leur rapport soit constant; il peut bien y avoir une variation séculaire atteignant 10^{-8} par siècle.

Il est clair également que les deux sortes d'horloges continueront d'être utilisées. La seconde de Temps des Éphémérides sur laquelle repose l'astronomie dynamique est nécessaire à l'astronome. L'horloge atomique, facilement disponible au laboratoire, est nécessaire au physicien. La législation ne peut modifier aucun de ces faits.

Mais les astronomes et les physiciens ne sont pas deux races distinctes habitant des planètes différentes. Les actions des uns influent sur celles des autres et, parfois, le physicien et l'astronome sont réunis en une seule personne. Il est certain que l'emploi d'un seul mot pour désigner deux concepts physiques fondamentalement différents doit produire des confusions et de fausses interprétations.

Il n'y a pas d'analogie entre le cas de la seconde et celui du mètre. Le mètre, tel qu'il fut initialement défini, était une unité arbitraire, disponible seulement à Sèvres. Maintenant le mètre est une unité naturelle, disponible pour tout le monde avec la même facilité et la même précision. Les unités de temps astronomique et atomique, d'autre part, sont toutes les deux des unités naturelles, toutes les deux sont disponibles pour tout le monde, mais non avec la même facilité et la même précision; pour atteindre la précision atomique par des moyens astronomiques il faut attendre de longues séries d'observations. Les intervalles de temps astronomique sont obtenus comme la différence entre deux époques, tandis que les intervalles de temps atomique sont obtenus en intégrant des fréquences par rapport au temps. Dans ce dernier cas, il apparaît une constante d'intégration indéterminée; il est impossible de mettre à l'heure une horloge atomique sinon par comparaison avec l'étalon astronomique. Les physiciens sont toutefois satisfaits, puisque l'heure ne les préoccupe pas.

Pour l'astronome, le concept fondamental dans la conservation du temps est l'époque; il obtient la fréquence par dérivation. Pour le physicien, le concept fondamental est la fréquence; il obtient le temps par intégration, en utilisant des constantes fournies par l'astronome.

Il est donc tout à fait logique, et en accord avec les besoins fondamentaux des deux sciences, de définir l'unité de temps par des opérations propres à l'astronomie et l'unité de fréquence par des opérations propres à la physique. Par ce moyen rien n'est perdu et ce que l'on gagne c'est l'absence de risque de confusion, l'économie dans la description et la précision du langage.

(4 avril 1961)

ANNEXE 5

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

LES ÉTALONS ATOMIQUES
DE FRÉQUENCE AU N. B. S.

Par J. M. RICHARDSON, R. E. BEEHLER,
R. C. MOCKLER et R. L. FEY

(Traduction)

De nombreux laboratoires, dans divers pays, ont maintenant montré que certaines fréquences de résonance atomiques présentent de tels avantages que l'on peut considérer qu'elles conviennent pour une définition de l'unité de temps. Dans ce cas, il est essentiel de connaître en détail les performances des dispositifs de résonance atomique et d'évaluer jusqu'à quel point un dispositif donné s'approche de la fréquence de résonance théorique ν_0 . Cette donnée caractérise l'exactitude du dispositif par rapport à ν_0 et elle indiquera comment effectuer un montage pratique pour réaliser la définition théorique.

Récemment deux étalons de fréquence à jet de césium, de conception et de construction indépendantes, ont été terminés, éprouvés et comparés à Boulder [1], [2]. Les principales caractéristiques de construction de ces dispositifs sont exposées dans le tableau I.

Plusieurs causes peuvent limiter l'exactitude (au sens ci-dessus) d'un étalon atomique de fréquence; elles comprennent : le champ magnétique uniforme C , la différence de phase entre les deux champs électromagnétiques oscillants, la pureté spectrale de la radiation excitant la résonance atomique et la présence d'autres transitions atomiques voisines. Dans le cas des étalons du N. B. S. les erreurs de fréquence possibles dues à ces causes et à d'autres causes ont été soigneusement étudiées. Les résultats sont également donnés dans le tableau I. Dans les cas où une variation de fréquence est mesurable, de sorte qu'une correction peut être

appliquée à la mesure (extrapolation à un champ magnétique nul par exemple), on considère, comme contribution à l'inexactitude du dispositif, non pas cette variation mais seulement l'incertitude qui l'affecte.

TABLEAU I
*Caractéristiques des étalons de fréquence
à jet de césium du N. B. S.*

	NBS I	NBS II
<i>Caractéristiques :</i>		
Dimensions du jet.....	$0,008 \times 0,254$ cm	$0,038 \times 0,475$ cm
Distance entre les champs oscillants.....	55 cm	164 cm
Largeur de raie.....	300 Hz	120 Hz
Écrans magnétiques.....	Simple	Triple
Q (Cavité).....	5 000	5 000
<i>Corrections à la fréquence :</i>		
Champ C.....	5×10^{-11}	9×10^{-11}
Variation de phase.....	$0,8 \times 10^{-11}$	$0,2 \times 10^{-11}$
Spectre de puissance.....	0	0
Résonances voisines.....	0	0
Niveau de puissance, dés- accord de la cavité.....	0	0
<i>Incertitudes sur la fréquence :</i>		
Champ C.....	$\pm 0,4 \times 10^{-11}$	$\pm 0,5 \times 10^{-11}$
Variation de phase.....	$\pm 0,2 \times 10^{-11}$	$\pm 0,4 \times 10^{-11}$
Spectre de puissance.....	0	0
Résonances voisines.....	0	0
Niveau de puissance, dés- accord de la cavité.....	0	0
Précision de la mesure.....	$\pm 0,2 \times 10^{-11}$	$\pm 0,2 \times 10^{-11}$
Total.....	$\pm 0,8 \times 10^{-11}$	$\pm 1,1 \times 10^{-11}$
Différence mesurée (NBS II-NBS I) _{moy}		$-1,6 \times 10^{-11}$

Les champs uniformes C sont normalement réglés entre 0,035 et 0,050 oersted. Ils sont produits par le passage d'un courant dans un conducteur rigide en U pour l'appareil NBS I et dans un montage rectangulaire de quatre fils parallèles pour l'appareil NBS II. La protection contre les champs parasites est assurée par un simple blindage cylindrique de mu-métal dans l'appareil I et par un blindage constitué de trois couches de mu-métal et de fer doux dans l'appareil II. La non-uniformité mesurée du champ est inférieure à $\pm 0,001$ oersted. La correction de fréquence

à appliquer, pour le champ C utilisé dans une mesure, est déterminée en mesurant le champ au moyen de certaines transitions très sensibles au champ, telles que $(F = 4, m_F = 1) \leftrightarrow (F = 3, m_F = 1)$ ou $(F = 4, m_F = 1) \leftrightarrow (F = 3, m_F = 0)$. A titre de confirmation, des mesures sont aussi faites en utilisant les transitions à basse fréquence ($\Delta F = 0, \Delta m_F = \pm 1$) et un œrstedmètre à haute sensibilité. Dans les mesures de champ, la plus grande confiance est donnée aux mesures en micro-ondes puisque les raies spectrales aux basses fréquences sont plus sujettes aux variations de distorsion et de puissance. Les petites différences de 0,002 œrsted pour NBS I et 0,001 œrsted pour NBS II observées selon les méthodes de mesure sont prises comme incertitudes dans les déterminations du champ; elles produisent les incertitudes de fréquence correspondantes, indiquées dans le tableau I.

Une autre correction aux mesures de fréquence est nécessaire en raison de la différence de phase qui existe entre les champs oscillants séparés et qui est due à une absorption non uniforme de la puissance des micro-ondes à la surface des cavités. On observe physiquement cet effet en faisant tourner de 180° l'ensemble des cavités résonnantes et en appréciant la variation de fréquence. Avec NBS II une petite variation relative de 4×10^{-12} fut récemment observée, d'où une correction de la moitié de cette valeur, soit 2×10^{-12} pour la fréquence mesurée. Une variation quelque peu supérieure, de $1,6 \times 10^{-11}$, fut observée avec NBS I; il est possible qu'elle soit due aux imperfections apparentes des parois des cavités formées électrolytiquement.

Une troisième cause d'erreurs possibles est la proximité de transitions voisines dans le spectre atomique. Il peut en résulter des variations significatives de fréquence dans les mesures faites à de faibles champs C. Pour les mesures faites sur NBS II avec un champ de 0,020 œrsted, par exemple, on a détecté une variation systématique de $3,7 \times 10^{-11}$. On a reconnu qu'il était possible d'éliminer cette erreur en opérant avec des champs suffisamment élevés (0,047 œrsted pour NBS II).

Un dernier facteur qui a été reconnu être la cause de grandes variations de fréquence dans certaines conditions est la pureté spectrale de la radiation excitant la transition atomique [3]. On a observé des variations de 32×10^{-10} en excitant la résonance avec un signal contenant des bandes latérales disposées dissymétriquement par rapport à la fréquence porteuse. On peut aussi éliminer ces effets en utilisant un oscillateur à phase asservie à l'oscillateur soumis à la mesure, avec des constantes de temps convenablement choisies pour profiter de la stabilité à long terme de l'oscillateur initial et de la stabilité à court terme de l'oscillateur à phase asservie. On a reconnu négligeables, dans des conditions normales de fonctionnement, les incertitudes additionnelles dues

au niveau de puissance appliquée et au désaccord de la cavité résonnante.

L'incertitude par rapport à ν_0 par suite des effets ci-dessus est indiquée dans le tableau I. Pour obtenir une limite d'erreur pour chaque appareil nous devons aussi ajouter l'incertitude aléatoire associée aux mesures elles-mêmes, telle qu'elle est limitée par la stabilité de l'oscillateur-volant. Une mesure de fréquence sur chaque montage exige environ 15 s. L'écart-type d'une telle mesure est normalement d'environ 1×10^{-11} , tandis que l'écart-type de la moyenne de 15 à 20 mesures effectuées en 10 minutes environ est 2×10^{-12} . Nous adoptons cette valeur comme précision de la mesure des fréquences et de la différence des fréquences des deux appareils.

Si l'on suppose que les incertitudes sont dépendantes les unes des autres, on évalue l'erreur totale d'une mesure absolue de fréquence en additionnant toutes les incertitudes. Évaluée de cette façon, l'exactitude de NBS I est de $\pm 0,8 \times 10^{-11}$ et celle de NBS II de $\pm 1,1 \times 10^{-11}$. La différence de fréquence entre les deux devrait être de l'ordre de $\pm 1,9 \times 10^{-11}$ (écart-type).

Si, au contraire, on considère que les diverses incertitudes sur la fréquence sont indépendantes, on devrait les élever au carré, les additionner et ensuite extraire la racine carrée pour obtenir la limite d'erreur. Dans cette hypothèse l'erreur est évaluée à $\pm 0,5 \times 10^{-11}$ pour NBS I et $\pm 0,7 \times 10^{-11}$ pour NBS II. La différence de fréquence devrait être de l'ordre de $\pm 0,8 \times 10^{-11}$ (écart-type). La différence de fréquence moyenne mesurée est :

$$(\text{NBS II} - \text{NBS I})_{\text{moy}} = - (1,6 \pm 0,3) \times 10^{-11}.$$

L'évaluation de l'erreur et les mesures semblent alors concorder raisonnablement. Nous pouvons dire que l'exactitude avec laquelle chaque appareil approche ν_0 est d'environ $\pm 2 \times 10^{-11}$ et la précision $\pm 2 \times 10^{-12}$.

Les comparaisons de fréquences entre NBS II et NBS I ont été poursuivies pendant plus d'un an. Puisque les étalons du NBS ne sont pas utilisés avec des oscillateurs asservis à la résonance atomique, on les compare en notant la différence entre les mesures successives sur les deux appareils d'un oscillateur à quartz très stable ou d'un maser à ammoniac. La meilleure valeur pour la différence entre les deux appareils est actuellement celle donnée ci-dessus. L'analyse des résultats des comparaisons effectuées de février à mars 1960 et de quelques résultats récents de février 1961 montre que, pour des conditions similaires des champs C durant les deux périodes, la différence de fréquence relative entre NBS II et NBS I n'a pas varié de plus de 2×10^{-12} en un an.

A Boulder on a également fait des comparaisons régulières pendant une période de près de deux ans de l'Atomichron R 106 avec NBS I et NBS II. Pendant ce temps le tube du jet de l'Atomichron R a été remplacé deux fois. Le premier remplacement, en octobre 1959, a entraîné une variation relative de la fréquence de l'Atomichron R de 3×10^{-10} ; le second remplacement, en mai 1960, a produit une variation de fréquence de 5×10^{-11} seulement. Durant les quinze derniers mois, lorsque l'Atomichron R a été mesuré presque quotidiennement, la différence de fréquence moyenne observée était $0,9 \times 10^{-10}$, avec un domaine maximal de $3,2 \times 10^{-10}$ pour 400 comparaisons environ. L'écart moyen était 4×10^{-11} et l'écart-type 6×10^{-11} .

Les systèmes utilisant la résonance du césium pour stabiliser des oscillateurs à quartz n'ont pas jusqu'ici été mis au point de façon à utiliser pleinement la stabilité montrée par les appareils à jet fonctionnant comme résonateurs passifs.

L'étalon de fréquence des États-Unis (NBS I ou NBS II décrits ci-dessus) est disponible pour des comparaisons avec d'autres étalons de fréquence dans le monde par l'intermédiaire des Stations Radio du N. B. S. : WWVB, 60 kHz et WWVL, 20 kHz, qui se trouvent toutes les deux près de Boulder, Colorado. La fréquence porteuse de WWVB est dérivée de la fréquence d'un Atomichron R par synthèse directe. Celle de WWVL est dérivée de celle d'un oscillateur à cristal; la fréquence émise est reçue et comparée quotidiennement à celle des Atomichrons R en utilisant une moyenne établie sur 24 heures. La fréquence de l'Atomichron R est à son tour comparée une fois par jour à celle de l'étalon atomique du N. B. S. en utilisant une moyenne établie sur environ 10 minutes. On mesure de la même manière les autres signaux reçus en ondes kilométriques et myriamétriques. Cette méthode réduit inévitablement la stabilité accessible de NBS I ou NBS II dans leur emploi pour assigner des valeurs aux fréquences porteuses émises ou reçues, par suite de la variabilité observée de l'Atomichron R mentionné plus haut.

Les fréquences quotidiennes de WWVB et WWVL, telles qu'elles sont reçues et publiées par d'autres laboratoires possédant des étalons atomiques, sont utilisées pour établir des moyennes mensuelles qui sont généralement enregistrées pour obtenir des indications sur l'accord existant entre l'étalon du N. B. S. et ceux des autres laboratoires. Lorsqu'il n'existe pas de liaison directe entre les laboratoires de Boulder et un autre étalon, les relations entre tous les étalons peuvent être établies par des comparaisons multiples. A partir de ces données on peut faire quelques constatations générales au sujet de la concordance entre les étalons : parmi les huit étalons N. B. S., N. R. L., Naval Observatory, Cruft, N. R. C., N. P. L., C. N. E. T. et Neuchâtel,

les différences entre les deux étalons les plus divergents se situaient entre 8×10^{-10} et 3×10^{-10} de septembre 1960 à février 1961. Une différence moyenne plus caractéristique entre les stations était peut-être de l'ordre de 1 ou 2×10^{-10} , avec des fluctuations du même ordre d'un mois à l'autre. Il y avait à peu près autant d'étalons dont la fréquence était supérieure à celle des Laboratoires de Boulder que d'étalons dont la fréquence était inférieure, quelques passages d'un groupe à l'autre se produisant au cours du temps.

On a toutefois rassemblé maintenant assez de résultats de plusieurs stations de contrôle pour permettre une étude statistique détaillée, qui donnera plus de résultats quantitatifs que celle qui vient d'être présentée. En conséquence, d'après ces résultats, la période de septembre 1960 à février 1961 a été de nouveau choisie et soumise à une analyse de variance à deux facteurs [4]. Le modèle sur lequel cette analyse était fondée suppose qu'il y a deux causes qui peuvent systématiquement influencer sur le résultat d'une comparaison des fréquences entre les paires d'étalons au moyen de la propagation radio. Ce sont :

- 1° les différences systématiques qui peuvent exister entre les fréquences des divers étalons;
- 2° les différences systématiques que l'on peut observer dans les fréquences reçues d'un jour à l'autre, et qui sont dues aux fluctuations de fréquence de l'émetteur et aux fluctuations du milieu de propagation.

En outre, des fluctuations résiduelles, que l'on ne peut attribuer à aucune de ces causes, sont considérées comme d'autres erreurs de mesure aléatoires, telles que : les variations d'un jour à l'autre dans la propagation radio qui ne sont pas communes à tous les trajets vers les récepteurs, les variations d'un jour à l'autre des étalons atomiques de contrôle individuels, et les autres variations des récepteurs d'un jour à l'autre.

Le résultat des mesures de la fréquence porteuse d'une station, effectuées pendant un mois par le plus grand nombre possible de laboratoires, a été choisi comme unité commode pour un examen statistique; l'hypothèse nulle soumise à l'examen est alors que les moyennes des populations à partir desquelles les observations ont été obtenues sont toutes égales, en supposant que la moyenne est calculée des deux façons suivantes :

- a. totalité des étalons pour un jour donné;
- b. totalité des jours pour un étalon donné.

Si l'examen démontre que l'hypothèse est fautive, c'est-à-dire s'il existe des écarts statistiques importants entre les étalons et entre les différents jours, l'analyse donne une mesure de l'import-

tance de ces écarts, aussi bien qu'une mesure des erreurs d'observation aléatoires.

L'analyse a été effectuée pour chacun des émetteurs GBR, NBA, WWVL et WWVB, d'après les données de tous les laboratoires qui ont contrôlé ces stations. Pour toutes les stations il y eut chaque mois quelques jours sans résultats pour un ou plusieurs laboratoires participants, ce qui permit d'utiliser environ 12 à 20 résultats quotidiens par mois.

Les résultats de l'analyse ont montré qu'en général il existe des différences statistiques importantes selon les étalons et les jours. Elles sont présentées dans le tableau II comme des écarts-types attribuables aux causes indiquées plus haut. Toutes les valeurs sont statistiquement significatives au seuil de 5 % d'après la méthode d'essai F de Fisher, *sauf* celles qui sont marquées d'un astérisque. Les laboratoires qui ont contrôlé chaque émetteur sont inscrits au bas de la colonne de l'émetteur en question. Les valeurs du tableau II doivent être comprises de la manière suivante : si, pendant un mois donné, une observation journalière unique de la fréquence d'un émetteur particulier est faite par une station réceptrice choisie au hasard, l'écart-type total σ_T de cette observation est la racine carrée de la somme des carrés des trois écarts-types indiqués dans le tableau II, c'est-à-dire

$$\sigma_T = (\sigma_S^2 + \sigma_D^2 + \sigma_R^2)^{\frac{1}{2}},$$

où σ_S , σ_D et σ_R se rapportent respectivement aux écarts-types dus aux différences entre les étalons, aux différences entre les jours et aux différences résiduelles.

Examinons brièvement les résultats pour chaque cause de variation indiquée :

1° on peut s'attendre à ce que les différences entre les étalons soient de l'ordre de 1 à 2×10^{-10} ;

2° on a constaté que les différences entre les jours sont un peu plus importantes pour GBR. On pouvait s'y attendre puisque le groupe de laboratoires qui contrôlait GBR avait le plus long trajet moyen;

3° les valeurs des différences résiduelles sont généralement semblables, ce qui montre que les différentes techniques de mesure ont une précision comparable. La concordance d'un mois à l'autre pour GBR, et aussi pour WWVL, indique qu'aucun facteur inconnu important n'affecte la mesure.

Les résultats pour NBA à notre disposition sont insuffisants pour permettre des comparaisons et ceux pour WWVB sont incertains en raison de la faible puissance émise.

TABLEAU II
Résultats de l'analyse de variance
 (Unité : 10⁻¹⁰)

		Station émettrice				
		GBR	NBA	WWVL	WWVB	
		16	18	20	60	
		Puissance rayonnée.....	40 kW	40 kW	15 W	1,5 W
(a) Écart-type σ_s , associé aux différences moyennes entre les étalons des laboratoires de contrôle indiqués	Sept.....	—	1,08	0,43*	3,7	
	Oct.....	2,02	0,98*	0,58	3,7	
	Nov.....	1,79	—	0,70	10,2	
	Déc.....	2,16	—	1,76	1,1	
	Jan.....	1,26	—	0,99	1,1*	
	Fév.....	2,10	—	1,06	—	
Moyenne pondérée.....		1,94	1,03	1,10	—	
(b) Écart-type σ_D , associé aux différences moyennes entre les jours, telles qu'elles sont mesurées par les mêmes laboratoires de contrôle que ci-dessus	Sept.....	—	0,84	0,93*	0,00*	
	Oct.....	1,82	0,00*	0,78	0,66*	
	Nov.....	5,27	—	2,70	1,05*	
	Déc.....	4,16	—	2,09	0,78	
	Jan.....	2,48	—	2,60	1,08	
	Fév.....	1,05	—	1,95	—	
Moyenne pondérée.....		3,57	0,55	1,96	—	
(c) Écart-type σ_R , associé aux différences résiduelles telles qu'elles sont mesurées par les mêmes laboratoires de contrôle que ci-dessus	Sept.....	—	0,33	2,10	2,9	
	Oct.....	1,08	3,02	0,35	0,9	
	Nov.....	1,61	—	1,45	9,5	
	Déc.....	1,88	—	1,15	1,4	
	Jan.....	1,16	—	1,62	2,8	
	Fév.....	0,90	—	1,71	—	
Moyenne pondérée.....		1,15	—	1,18	—	
Laboratoire contrôlant chaque station émettrice		}	NBS	Nav. Obs.	NBS	NBS
			NRC	NRL	NRL	NRL
			NPL	NPL	Cruft	NRC
			CNET	CNET		Cruft
			Cruft	Cruft		
				Neuchâtel		

* Statistiquement non significatif.

(Toutes les autres valeurs sont significatives au seuil de probabilité de 5%).

Bien que le jet de césium soit le dispositif qui ait bénéficié du plus haut degré de perfectionnement, de l'emploi le plus étendu et des comparaisons les plus nombreuses, nous devons néanmoins considérer d'autres dispositifs fondés sur d'autres atomes ou molécules. Ce sont le maser à jet de NH_3 , le résonateur à cellule à Rb gazeux, le maser à hydrogène atomique et le jet de Tl. On a fait une expérience très poussée avec le maser à $^{14}\text{NH}_3$ [5] et on est arrivé à la conclusion que le maser à $^{14}\text{NH}_3$ n'est pas un concurrent sérieux du jet de Cs. Bien qu'on puisse tirer du maser un signal oscillatoire d'une extrême pureté spectrale (quelques 10^{-12} , meilleure que toute autre source de fréquence radio), il subit des variations de fréquence de l'ordre de quelques 10^{-9} selon des détails de fonctionnement, tels que le débit du jet, la tension du focaliseur, l'accord de la cavité, le choix de l'isotope et l'élimination incomplète de l'effet Doppler. On peut dire que dans un tel maser les molécules ne sont pas si bien isolées que les atomes dans le jet de Cs et sont ainsi sujettes à une plus grande perturbation. Les conditions de fonctionnement du maser doivent être spécifiées avec plus de soin que celles du Cs pour obtenir une reproductibilité comparable.

On a examiné des étalons de fréquence à cellules à gaz dans plusieurs laboratoires [6]. Le rubidium semble être l'élément le plus intéressant et il a par suite retenu la plus grande attention. On peut déterminer avec une très haute précision la fréquence hyperfine du rubidium dans une cellule à gaz en utilisant les techniques de pompage optique. Toutefois, la fréquence peut être modifiée par le gaz tampon. Puisque des impuretés (background contaminants) peuvent avoir une influence sur la fréquence, on peut s'attendre à une dérive de l'étalon de fréquence à cellule à gaz quand la densité ou la composition du gaz tampon change. On a construit des cellules telles que ce vieillissement soit inférieur à 1×10^{-11} par mois et on pense que le vieillissement pourrait être considérablement diminué. On peut réduire la sensibilité à la température par un choix judicieux de la composition du gaz tampon. On peut construire des cellules qui reproduisent la même fréquence avec des erreurs inférieures à 1×10^{-10} .

On a trouvé que les étalons de fréquence à cellules à gaz étaient quelque peu sensibles à l'intensité du rayonnement de pompage. Les niveaux d'énergie peuvent être déplacés par une répartition de lumière incidente dissymétrique par rapport aux raies d'absorption. Ce rayonnement provoque des transitions virtuelles de l'état excité. Le changement produit dans l'énergie est différent selon les divers sous-niveaux hyperfins et apparaît comme une variation dans la fréquence de résonance hyperfine. Il est possible de prévoir des conditions telles que la variation de fréquence due au rayonnement optique soit relativement faible. Le changement

de fréquence à long terme provoqué par cette influence peut atteindre 1×10^{-10} .

Le maser à hydrogène atomique [7] est plein de promesses et permettra peut-être des précisions de quelques 10^{-13} . Étant donné sa mise au point récente nous manquons actuellement de connaissances étendues sur ses caractéristiques de fonctionnement. Cette question est traitée dans un rapport séparé soumis à ce Comité Consultatif. (Annexe 1, p. 43).

La résonance de ^{205}Tl à 21311 MHz a été proposée et jugée digne d'examen à cause de sa fréquence plus élevée, de sa plus faible sensibilité au champ magnétique et de la plus grande masse de cet élément. Jusqu'ici on a détecté un jet de Tl au N. B. S. Les travaux se poursuivent.

De la discussion qui précède, nous pouvons conclure que le degré auquel un étalon à césium soigneusement construit et contrôlé peut actuellement approcher la résonance théorique du Cs est de l'ordre de quelques 10^{-11} . Ceci ne tient pas compte des prescriptions spéciales ou arbitraires de conception et de fonctionnement, mais seulement de la connaissance des paramètres propres à fournir une exactitude suffisante. La comparaison de divers dispositifs à Cs indique une concordance à quelques 10^{-10} . La précision d'une comparaison intercontinentale par radio en ondes myriamétriques peut être faite à mieux que 1×10^{-10} . Il est intéressant de noter au passage que la précision d'une comparaison intercontinentale de fréquence est sensiblement égale à la précision des étalons actuels; si l'on réalise des étalons d'une plus haute précision, de l'ordre de 10^{-13} , par exemple, il sera peut-être difficile de les comparer. La recherche et le progrès vont évidemment se poursuivre rapidement, de sorte que l'on peut espérer à l'avenir des étalons supérieurs à l'étalon de Cs. Cependant, l'apparition d'un tel étalon supérieur se ramènera simplement au problème de le comparer aux étalons à Cs existants plutôt qu'à une nouvelle comparaison avec la seconde des Éphémérides, de sorte qu'il n'y aura pas d'obstacle pour une amélioration future et facile de l'unité de temps.

Nous pensons donc qu'il est à la fois possible et avantageux de recommander qu'une définition de la seconde en fonction de la transition ($F = 3, m_F = 0$) \leftrightarrow ($F = 4, m_F = 0$) de ^{133}Cs soit adoptée en 1966, sur la base des meilleurs renseignements dont nous disposerons alors en ce qui concerne la fréquence de transition en fonction de la seconde actuelle.

Ce rapport est l'œuvre de nombreuses personnes. Les auteurs expriment leur reconnaissance à A. H. Morgan, D. H. Andrews et P. A. Simpson, qui sont chargés des émissions de fréquence étalon au N. B. S. et de la comparaison de l'Étalon de fréquence

des États-Unis avec les autres étalons de fréquence mondiaux par voie radioélectrique.

Les techniques statistiques employées ont été suggérées par le Dr E. L. Crow. Le Dr E. C. Beaty a coopéré à la description de la cellule au rubidium.

Enfin, nous désirons remercier les autres membres de la Section des Étalons Atomiques de fréquence, spécialement Ch. Snider, pour leur travail effectué sur l'Étalon de fréquence des États-Unis.

(Texte révisé, 21 avril 1961)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BEEHLER (R. E.), MOCKLER (R. C.) et SNIDER (C. S.), A comparison of atomic beam frequency standards, *Nature*, 1960, 187, p. 681.
- [2] MOCKLER (R. C.), BEEHLER (R. E.) et SNIDER (C. S.), Atomic beam frequency standards, *Trans. I. R. E.*, I-9, 1960, p. 120.
- [3] BARNES (J. A.) et MOCKLER (R. C.), The power spectrum and its importance in precise frequency measurements, *Trans. I. R. E.*, I-9, 1960, p. 149.
- [4] CROW (E. L.), DAVIS (F. A.) et MAXFIELD (M. W.), *Statistics, Manual*, Dover Publications, Inc., 1960, chap. 5.
- [5] MOCKLER (R. C.), BARNES (J.), BEEHLER (R.), SALAZAR (H.) et FEY (L.), The ammonia maser as an atomic frequency and time standard, *Trans. I. R. E.*, I-7, 1958, p. 201.
- [6] CARPENTER (R. J.) et al., A prototype rubidium vapor frequency standard, *Trans. I. R. E.*, I-9, 1960, p. 132.
BELL (W. E.) et BLOOM (A. L.), Optically detected field independent transitions in sodium vapor, *Phys. Rev.*, 1958, 109, p. 219.
ANDRES (J. M.), FARMER (D. J.) et INOUE (G. T.), Design studies for a rubidium gas frequency standard, *Trans. I. R. E.*, Mil-3, 1959, p. 178.
BENDER (P. L.), BEATY (E. C.) et CHI (A. R.), Optical detection of narrow ^{87}Rb hyperfine absorption lines, *Phys. Rev. Letters*, 1958, 1, p. 311.
ARDITI (M.) et CARVER (T. R.), Frequency shifts of microwave resonances in gas cell using optical pumping, *Proceedings of the 14th Annual Symposium on Frequency Control*, May 1960, p. 329.
- [7] GOLDENBERG (H. M.), KLEPPNER (D.) et RAMSEY (N. F.), Atomic hydrogen maser, *Phys. Rev. Letters*, 1960, 5, p. 361.

ANNEXE 6

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

MÉTHODES ET TECHNIQUES DE CONTRÔLE DES ONDES KILOMÉTRIQUES ET MYRIAMÉTRIQUES AUX BOULDER LABORATORIES

Par A. H. MORGAN et D. H. ANDREWS

(Traduction)

Résumé. — On donne une brève description des trois méthodes de contrôle des émissions en ondes kilométriques et myriamétriques aux Boulder Laboratories. On examine plus en détail le dispositif à phase asservie, y compris ses avantages, sa stabilité et son exactitude.

Les résultats obtenus dans le contrôle de GBR (16 kHz) et de NBA (18 kHz) par rapport à l'Étalon de fréquence des États-Unis sont réunis sous forme de tableau. On projette de poursuivre ces mesures indéfiniment.

1. INTRODUCTION. — Trois méthodes différentes d'observation des variations de phase ou de temps d'arrivée d'un signal ont été employées aux Boulder Laboratories (B. L.). L'une est une méthode photographique et les deux autres sont des méthodes analogiques, c'est-à-dire que la différence entre la phase locale et la phase reçue est transformée en courant ou tension qui est continuellement enregistré en fonction du temps.

Un rapport plus complet [1] est en préparation sur les méthodes ci-dessus, ainsi que sur plusieurs autres qui ont été étudiées aux B. L.

2. DESCRIPTION SOMMAIRE DES MÉTHODES EMPLOYÉES. — Une méthode photographique simple [2] a été employée avec succès aux B. L. Le signal d'entrée, de fréquence f_r , est utilisé pour moduler l'axe Z de l'oscilloscope. Une fréquence d'origine locale, nominale égale à f_r , est utilisée pour déclencher le balayage de l'oscilloscope. Les indications horaires sur le film, c'est-à-dire

de brèves interruptions du balayage toutes les heures et l'éta-lonnage du balayage de l'oscilloscope, fournissent les informations nécessaires pour transformer l'enregistrement sur le film en différence moyenne entre la fréquence reçue et la fréquence locale pendant la période de mesure choisie. On considère généra-lement une période de mesure de 24 heures pour obtenir une précision élevée et pour réduire les influences diurnes. Une autre méthode simple utilisée fait appel à la technique de la fréquence de battement [2]. Avec cette méthode on obtient facilement un système à bande étroite (environ 0,01 Hz) par une intégration après détection. Pour ajuster la période de la fréquence de battement de façon à obtenir la phase à des intervalles appropriés, on peut séparer l'oscillateur de référence du signal reçu. On ne

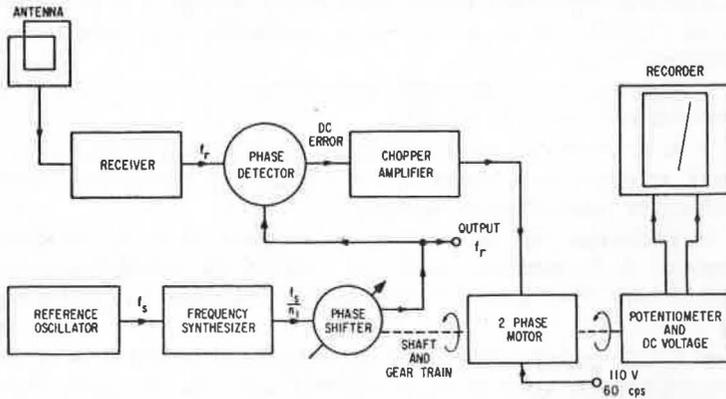


Fig. 1. — Système à phase asservie et enregistreur.

peut obtenir avec précision la phase enregistrée que lors du passage au zéro de la fréquence de battement, puisque la variation de l'amplitude du signal reçu apparaît dans l'amplitude du signal de battement.

Un système qui présente de nombreux avantages sur les deux systèmes décrits ci-dessus est schématisé dans la figure 1. La fréquence de référence locale est ajustée à une valeur qui est nominalement la même que celle qui est reçue. Il est très important que la fréquence locale soit exempte de variations de phase telles qu'il peut s'en produire dans les diviseurs ou les multivibrateurs à oscillateur asservi. Un dispositif synthétiseur [3], récemment mis au point aux B. L., s'est montré supérieur à tous les autres dispositifs utilisés ou étudiés.

La fréquence locale, après son passage à travers le déphaseur, est maintenue en phase asservie avec la fréquence reçue au moyen d'un détecteur de phase et d'un servomécanisme (fig. 1).

Pour convertir en tension la position angulaire du déphaseur, un potentiomètre 360° à curseur est relié à son axe. Quand on applique une tension continue constante au potentiomètre linéaire, la position de l'axe est alors proportionnelle à la tension qui apparaît entre le curseur mobile et une extrémité du potentiomètre. Cette dernière tension (ou courant) est enregistrée en fonction de l'heure sur une bande graphique. Bien que sur le schéma de la figure 1 le déphaseur soit utilisé à la fréquence nominale reçue, il peut aussi être employé à une fréquence supérieure dans le synthétiseur. Aux B. L. on le fait fonctionner à 100 kHz, si bien qu'un tour de l'axe fait varier la phase du signal local de 10 μ s. La tension continue appliquée au potentiomètre est alors réglée de telle sorte que pour un tour du curseur la plume enregistreuse balaie entièrement la largeur de la bande. Ainsi l'échelle totale de la bande représente une variation de phase de 10 μ s.

Les autres caractéristiques souhaitables du servomécanisme sont les suivantes [4], [5], [6] :

1° L'existence de deux fréquences de l'oscillateur local, dont l'une est asservie au signal reçu et l'autre non perturbée et ainsi disponible pour d'autres usages;

2° L'absence de perturbation provoquée dans le fonctionnement de l'oscillateur local par l'action du servomécanisme; ceci se produirait dans des systèmes qui régleraient la fréquence de l'oscillateur local;

3° La fréquence asservie est en moyenne strictement la même que celle reçue. Dans ce cas la variable réglée du servomécanisme est la phase qui, dans ce type de servomécanisme de position, présentera une erreur constante d'équilibre, sauf pour des perturbations du système par « bruit » avec des périodes plus longues que le temps d'intégration du servomécanisme.

3. RÉSULTATS OBTENUS. — Deux facteurs opposés exigent que le temps d'intégration du servomécanisme décrit ci-dessus soit un compromis. Sur beaucoup de longs trajets radio les variations de phase diurnes peuvent se produire de façon relativement rapide, c'est-à-dire en une heure environ, surtout sur les trajets Nord-Sud ou Sud-Nord. Il est important que le servomécanisme soit conçu de façon à pouvoir suivre étroitement ces variations et ceci demande évidemment un temps de réponse relativement court. D'autre part, un temps d'intégration important réduit la largeur de bande effective du système et, par conséquent, diminue les influences du bruit extérieur. On doit noter que le temps de réponse à une fonction échelon de la variation de phase peut donner à l'ensemble du dispositif un temps de réponse plus long que le temps d'intégration.

Aux B. L. le temps d'intégration du système est d'environ 4 s, mais on projette de le multiplier par un facteur de 4 à 10, la valeur dépendant de la longueur du trajet radio particulier et de la fréquence à enregistrer.

Des essais de stabilité de l'ensemble du système, y compris le récepteur radio, montrent qu'il n'est pas trop difficile d'atteindre 1×10^{-12} sur une période de 24 heures. Par comparaison, les variations de phase diurnes peuvent produire des variations de fréquence Doppler atteignant $\pm 3 \times 10^{-9}$ à 5 200 km [1]. Ceci demande évidemment un oscillateur local de stabilité comparable ou supérieure.

TABLEAU I

Écarts des fréquences reçues aux NBS Boulder Laboratories par rapport à l'étalon de fréquence U.S.

- Notes. - 1. Les valeurs sont la moyenne sur les intervalles indiqués.
 2. Unité: 10^{-10} . Le signe - indique que la fréquence reçue était plus faible.
 3. La date indiquée est celle de la lecture initiale.
 4. Précision des mesures: $0,5 \times 10^{-10}$.

1960 Nov. 0500TU-0500TU	GBR (16 kHz)	1960 Déc. 0500TU-0500TU	GBR (16kHz)	1961 Janv. 0500TU-0500TU	GBR (16kHz)	1961 Fév. 0500TU-0500TU	GBR (16kHz)	NBA (16kHz) 1800TU-1800TU
17	-170,1	1	-	1	-142,1	1	-146,9	-153,4
18	-164,0	2	-153,1	2	-139,0	2	-151,0	-153,9
19	-164,2	3	-	3	-141,4	3	-150,6	-154,8
20	-160,7	4	-	4	-140,1	4	-148,2	-152,2
21	-163,8	5	-	5	-141,4	5	-149,4	-153,9
22	-161,6	6	-150,8	6	-143,3	6	-148,3	-151,9
23	-159,7	7	-	7	-143,2	7	-145,8	-
24	-159,2	8	-146,4	8	-142,6	8	-148,9	-
25	-158,7	9	-145,0	9	-144,7	9	-148,0	-
26	-158,9	10	-144,1	10	-141,8	10	-145,7	-
27	-157,3	11	-143,1	11	-143,4	11	-145,9	-
28	-157,5	12	-	12	-144,0	12	-145,2	-
29	-155,6	13	-140,8	13	-145,4	13	-144,2	-
30	-	14	-139,6	14	-147,5	14	-141,4	-150,3
		15	-140,5	15	-146,7	15	-140,2	-152,3
		16	-	16	-147,9	16	-141,2	-152,4
		17	-148,0	17	-147,5	17	-142,8	-152,1
		18	-151,4	18	-150,9	18	-144,3	-151,6
		19	-150,4	19	-151,7	19	-143,4	-150,7
		20	-	20	-151,2	20	-145,2	-150,5
		21	-148,1	21	-151,1	21	-145,6	-
		22	-	22	-147,4	22	-146,8	-
		23	-	23	-150,5	23	-143,6	-
		24	-	24	-148,7	24	-151,6	-153,2
		25	-	25	-150,3	25	-151,7	-
		26	-	26	-148,4	26	-149,5	-
		27	-	27	-154,1	27	-147,1	-
		28	-	28	-151,7	28	-143,6	-
		29	-139,6	29	-154,1			
		30	-142,9	30	-152,3			
		31	-141,2	31	-151,4			

Aux B. L. on a mesuré, depuis la mi-novembre 1960, la fréquence reçue de GBR (16 kHz) et, depuis la mi-février 1961, celle de l'U. S. Navy Station, NBA (18 kHz) (tableau I). On projette de poursuivre ces mesures indéfiniment.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MORGAN (A. H.) et ANDREWS (D. H.), Frequency calibration receiving systems using standard LF and VLF signals (sous presse).
- [2] PIERCE (J. A.), Intercontinental frequency comparison by VLF, *Proc. I. R. E.*, 1957, 45, n° 6, p. 794.
- [3] SIMPSON (P. A.), Fractional frequency dividers using magnetic beam switching tubes (sous presse).
- [4] MOOSER (L.), Frequency and phase control of local oscillators by transmitters of standard frequency. Proceedings of the 14th Annual Symposium on Frequency Control, 1960, p. 421-428.
- [5] STONE (R. R.), MARKOWITZ (W.) et HALL (R. G.), Time and frequency synchronization of Navy VLF transmissions, *I. R. E. Trans. Instrumentation*, 1960, 1-9, n° 2, p. 155-161.
- [6] LOONEY (C. H. Jr.), A very low frequency (VLF) synchronizing system, *Proc. I. R. E.*, 1961, 49, n° 2, p. 448.

ANNEXE 7

Observatoire de Neuchâtel (Suisse)

RAPPORT SUR LA COMPARAISON D'ÉTALONS ATOMIQUES DE FRÉQUENCE

I. — ÉTALONS ATOMIQUES UTILISÉS PAR L'OBSERVATOIRE DE NEUCHÂTEL

Les horloges à quartz de l'Observatoire de Neuchâtel sont reliées par lacet téléphonique aux étalons atomiques de fréquence du Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères. Elles sont étalonnées régulièrement par rapport aux étalons atomiques depuis le début de 1957.

Ont servi d'étalons jusqu'ici :

- a. Des masers à $^{14}\text{NH}_3$ de 1957,2 à 1959,5;
- b. Des masers à $^{15}\text{NH}_3$ et un résonateur à césium de 1959,5 à 1960,5;
- c. Un nouveau résonateur à césium depuis 1960,5;
- d. Parallèlement au résonateur mentionné sous (c), un maser à $^{15}\text{NH}_3$ à double jet à partir de 1961,3.

L'exactitude (accuracy) du résonateur à césium est évaluée à mieux que 10^{-10} ; celle du maser à double jet à environ 10^{-10} (voir Annexe 8, p. 78).

La reproductibilité à long terme (stability) des deux étalons est la même et de l'ordre de 2×10^{-11} .

II. — TEMPS ATOMIQUE

Le temps atomique de Neuchâtel est appelé TA_1 ; il est nominativement le même que A_1 ($f_{\text{TA}_1}(\text{Cs}) = 9\,192\,631\,770$ Hz); il est calculé sans interruption depuis 1957,2.

Les horloges à quartz servant à l'intégration du temps atomique sont étalonnées tous les 15 jours par rapport aux étalons atomiques

de fréquence. Si les étalons atomiques fonctionnaient en permanence et si la fréquence des horloges à quartz leur était asservie, le gain en précision du temps atomique ne serait pas significatif, comme le montrent les mesures effectuées en 1960 au moyen de plusieurs horloges à quartz, et dont l'essentiel est reproduit ci-dessous. On a comparé les temps atomiques TA_i , calculés par quatre horloges à quartz (Q_i), des mesures de fréquence par rapport aux étalons atomiques étant effectuées tous les 15 jours.

TABLEAU I

	Q_1-Q_2	Q_1-Q_3	Q_1-Q_4
$TA_i - TA_j$	53 μ s en 165 jours	77 μ s en 300 jours	180 μ s en 300 jours
$(TA_i - TA_j)/\Delta T$	4×10^{-12}	3×10^{-12}	7×10^{-12}
Écart-type (σ) par période de 15 jours.....	45 μ s	100 μ s	100 μ s
Écart extrapolé pour une année	225 μ s	500 μ s	500 μ s
$TA_i - TA_j = \sigma \sqrt{365/15}$	$= 7 \times 10^{-12}$	$= 1,6 \times 10^{-11}$	$= 1,6 \times 10^{-11}$

Il ressort du tableau I que si l'on utilise de très bonnes horloges, Q_1 et Q_2 , l'erreur, introduite en espaçant les mesures de 15 jours, reste inférieure à 10^{-11} en une année; elle diminue d'ailleurs suivant \sqrt{T} . Cette erreur doit être comparée à l'erreur de reproductibilité (stability), 2×10^{-11} , des étalons atomiques eux-mêmes.

III. — COMPARAISON DES ÉTALONS ATOMIQUES DE NEUCHÂTEL AVEC D'AUTRES ÉTALONS ATOMIQUES

1. *Comparaison des échelles de temps atomique par l'intermédiaire de signaux horaires (fig. 1).* — Les résultats de trois institutions nous étaient accessibles : les résultats anglais, à partir de 1955,5, basés sur l'étalon du National Physical Laboratory; les résultats américains, à partir de 1956,7, basés sur des Atomichrons; les résultats suisses, à partir de 1957,0, basés sur les étalons du L. S. R. H. à Neuchâtel. Étant donné que les variations du temps de propagation transatlantique atteignent 0,5 ms, cette méthode est lente pour détecter les fluctuations à court terme des étalons atomiques. A long terme, cependant, cette méthode est la plus sûre pour garantir la conservation du temps et non seulement de la fréquence.

2. *Comparaison par l'intermédiaire de la fréquence moyenne mensuelle de WWV (voir tableau II).* — Cette méthode se distingue

de celle du paragraphe 1 par un nombre plus grand d'institutions participantes, mais aussi par une précision moins bonne. Pour une transmission transatlantique la moyenne mensuelle ne peut être indiquée qu'à 10^{-10} près.

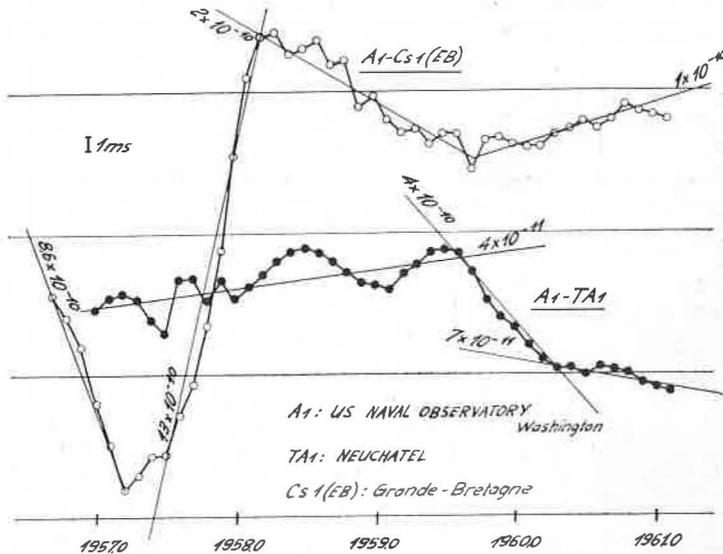


Fig. 1. — Comparaison des temps atomiques A_1 , TA_1 et $Cs_1(EB)$ par l'intermédiaire des signaux horaires de WWV.

TABLEAU II

$f_{\text{étalon}} - f_{\text{WWV}}$ (en 10^{-10})

	Neuchâtel	U. S. Naval (A1)	N. P. L.	N. B. S.
Avril 1960.....	148	148	148	146
Mai.....	148	147	149	145
Juin.....	147	146	148	147
Juillet.....	147	148	150	149
Août.....	145	146	146	145
Septembre.....	148	146	144	149
Octobre.....	148	146	142	148
Novembre.....	150	148	148	150
Décembre.....	151	150	150	150
Janvier 1961.....	150	150	150	150,9
Février.....	152	(150)	149	150,3
Moyenne.....	148,5	147,7	147,6	148,2
Écart de la moyenne.....	+0,5	-0,3	-0,4	+0,2

3. Comparaison par mesures de la phase de porteuses de fréquence très basse (NBA et GBR). — Ce point est mentionné dans le rapport de B. Decaux (p. 37); nous nous bornerons à présenter le résultat de nos mesures (fig. 2) et à ajouter quelques remarques.

3.1. La figure 2 donne la fréquence des étalons à césium de plusieurs institutions, comparée à la fréquence de l'étalon à

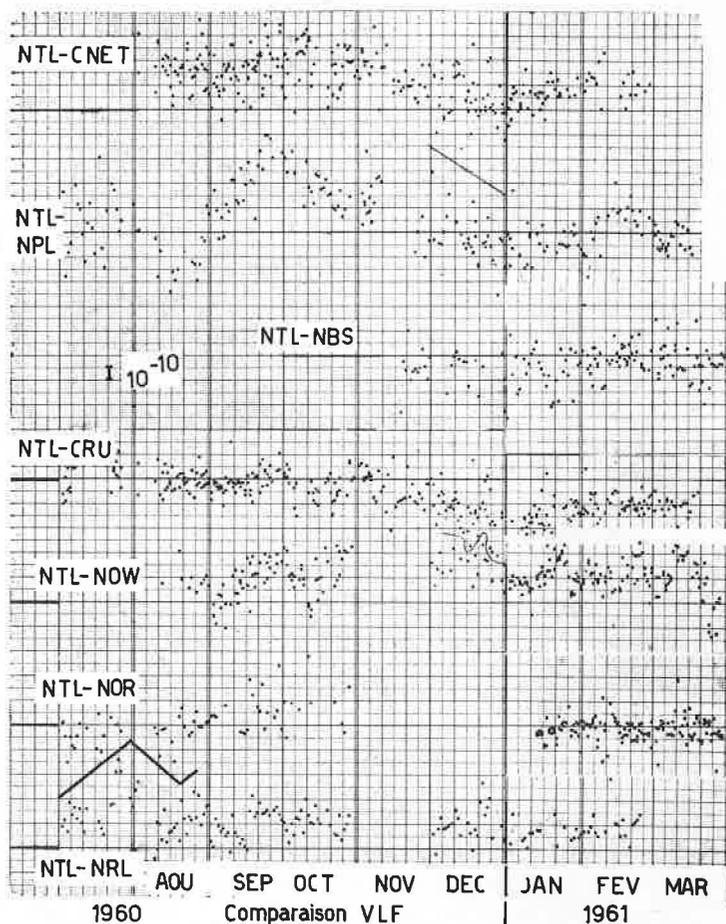


Fig. 2. — Fréquence des étalons à césium de plusieurs institutions, comparée à la fréquence de l'étalon à césium de Neuchâtel par l'intermédiaire de NBA et GBR.

NTL, Neuchâtel; CNET, Paris-Bagneux; NOW, Naval Observ. Washington; NPL, Teddington; NBS, Boulder; CRU, Harvard; NOR, Richmond; NRL, Naval Res. Lab., Washington.

césium de Neuchâtel, par l'intermédiaire de NBA et GBR. On voit que la dispersion de ces valeurs journalières varie sensiblement d'une institution à l'autre. Plusieurs causes peuvent être invoquées :

a. fluctuations à court terme de l'étalon atomique ou de l'horloge à quartz utilisés (exemple typique : la dispersion des résultats de Richmond, N. O. R., a beaucoup diminué après l'amélioration, en décembre 1960, de l'oscillateur à quartz);

b. fluctuations de l'enregistreur de la phase (les procédés photographiques, utilisés par Cruft et Neuchâtel, semblent supérieurs);

c. l'intervalle de mesure de 24 heures n'est pas centré sur la même heure de la journée.

Concernant le dernier point, l'Assemblée générale de l'U. R. S. I. (Londres, 1960) a adopté une résolution recommandant que l'intervalle de 24 heures soit placé de 15 h à 15 h T. U. Plusieurs institutions ne se sont pas encore conformées à cette recommandation.

3.2. Pour une comparaison de haute précision entre deux étalons, il est important qu'aucune mesure journalière ne manque. En effet, dans une série ininterrompue de mesures les fluctuations autres que celles de l'étalon (propagation, etc.) se compensent rigoureusement. Le tableau III donne, pour une série d'institutions, le nombre moyen de jours par mois pour lesquels des résultats ont été publiés.

TABLEAU III

Institution...	N. T. L.	C. R. U.	C. N. E. T.	N. B. S.	N. O. W.	N. R. L.	N. O. R.	N. P. L.	Moyenne
GBR.....	29	25	24	22	23	-	26	20	24
NBA.....	27	21	23	-	22	26	18	20	22

Ces chiffres sont susceptibles d'être augmentés :

1° en améliorant la sécurité de fonctionnement des récepteurs-enregistreurs;

2° en diminuant les périodes de silence prolongé des émetteurs.

(5 avril 1961)

ANNEXE 8

Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères

ÉTAT DES TRAVAUX SUR LES ÉTALONS ATOMIQUES DE FRÉQUENCE

Par J. DE PRINS, P. KARTASCHOFF,
C. MENOUD et J. RACINE

Le L. S. R. H., Neuchâtel, étudie deux types d'étalons de fréquence : 1° les résonateurs à jet de césium; 2° les masers à ammoniac.

Ces étalons permettent la définition d'une échelle de temps TA₁, susceptible d'être comparée aux autres échelles de temps atomique (A₁) par comparaison radio (WWV, NBA et GBR).

Un étalon de fréquence atomique est, en principe, un dispositif destiné à mesurer la fréquence moyenne des ondes électromagnétiques émises ou absorbées par un ensemble d'atomes ou de molécules.

Nous entendons par *exactitude*, la propriété pour un étalon de mesurer une fréquence identique à celle qui est émise ou absorbée par l'atome ou par la molécule employée en dehors de toute perturbation extérieure.

Nous définissons par *stabilité* d'un étalon, l'invariance de la fréquence mesurée au cours du temps, quelle que soit cette fréquence.

I. — ÉTUDE DES ÉTALONS DE FRÉQUENCE

1. Résonateur à jet de césium

Description. — Deux étalons de fréquence à jet atomique de césium [1], [6] ont été construits. Leurs dimensions mécaniques sont les suivantes :

	N° 1	N° 2
Longueur d'interaction.....	110 cm	408 cm
Longueur totale.....	250	600
Diamètre du récipient à vide.....	25	25

Le N° 1 étant une exécution préliminaire, la description suivante concerne principalement le N° 2.

Géométrie du jet. — Une géométrie asymétrique du jet, semblable à celle des Atomichrons [3], a été adoptée. La fente de collimation placée habituellement au centre a été supprimée et le jet est défini par les bords des entrefers des aimants A et B. Les positions de la source du jet et du détecteur sont ajustables perpendiculairement au jet. Une sélection des atomes lents est ainsi possible, ce qui permet une réduction importante de la largeur de raie.

Forme du jet, source et détecteur. — La section du jet à la source et au détecteur est de $0,7 \times 10$ mm. La source utilise du Cs métallique à une température de 100°C environ. Le détecteur est un ionisateur à ruban de tungstène chaud, suivi par un spectromètre de masse simplifié et un multiplicateur d'électrons secondaires de 17 étages.

Champ haute fréquence et champ H_c . — La cavité est une structure entièrement résonnante en forme de U avec un facteur de qualité $Q = 10^4$. La partie horizontale de cette structure a une longueur de 408 cm. Les deux sections verticales, traversées par le jet, ont une dimension de 5 cm dans la direction du jet, tandis que dans la plupart des autres réalisations cette dimension n'est que de 1 cm environ.

On peut ainsi utiliser un champ magnétique continu H_c plus faible dans la région de transition. Contrairement à l'usage général, les champs H. F. dans les deux sections d'interaction ne sont pas en phase mais déphasés de 180° , ceci permettant de réaliser un meilleur rapport de signal-bruit au centre de la résonance atomique. L'accord de la cavité entière peut être varié depuis l'extérieur par un piston en téflon sur un domaine de 2 MHz environ.

Le champ H_c est produit par quatre barres montées le long du jet à l'intérieur d'un écran double. Cet écran est construit en plaques de « Permalloy C » soigneusement recuit et il atténue les champs magnétiques extérieurs d'un facteur dépassant 100.

Aimants A et B. — Utilisant du « Ticonal », ces aimants permanents produisent un champ de 9 500 Oe. Les entrefers ont une longueur de 15 cm, une largeur de 4 mm et les rayons des pièces polaires sont de 10 et 11 mm. Les aimants sont montés dans des boîtes d'écran construites en acier doux et en fer Armco.

La structure de jet entièrement autoportante repose sur des petits chariots à l'intérieur du récipient à vide poussé. L'installation à vide comprend une pompe à diffusion d'huile autofractionnante (vitesse de pompage 600 l/s) et plusieurs trappes à air liquide.

Partie électrique [7]. — L'énergie micro-onde est produite par un klystron qui est synchronisé en phase sur un multiple de la fréquence d'un oscillateur à quartz de 8,5 MHz. Cet oscillateur est modulé en fréquence à 20 Hz. La modulation de l'amplitude du courant ionique est détectée dans un discriminateur de phase produisant un signal de correction appliqué à l'oscillateur à quartz.

Résultats obtenus avec l'étalon L. S. R. H. N° 2. — 1° La largeur de raie observée est de 40 Hz sans sélection de vitesse et diminue à 24 Hz avec sélection de vitesse. Des raies encore plus étroites ont été obtenues avec une perte correspondante de rapport signal-bruit.

2° La fréquence extrapolée à champ zéro est reproductible à environ $\pm 2 \times 10^{-11}$.

3° Lorsque le niveau de la puissance excitatrice est deux fois plus faible que le niveau où une saturation est observable, une réduction du niveau d'un facteur 10 produit un déplacement de fréquence plus petit que 3×10^{-11} .

4° Une variation de l'accord de la cavité de ± 1 MHz produit un déplacement de fréquence plus petit que 4×10^{-11} .

5° Une variation de la sélection de vitesse, obtenue par le changement de position du détecteur et du four, ne produit pas de déplacement de fréquence observable.

6° Les résultats des comparaisons par rapport à des étalons étrangers ont été présentés dans l'Annexe 7, p. 73.

2. Maser à $^{15}\text{NH}_3$ à simple jet

Cet appareil a été décrit ailleurs [5]. Rappelons brièvement quelques-unes de ses caractéristiques.

L'isotope ^{15}N est employé en vue, d'une part, d'assurer des raies simples pour le spectre d'inversion et, d'autre part, d'avoir un nombre minimal de molécules d'ammoniac dans la cavité.

TABLEAU I.

Nombre de molécules dans le jet (mol/s)	H_1 (ærsted)
10^{17}	0,8
5×10^{17}	0,9
10^{18}	1,1
2×10^{18}	1,4
5×10^{18}	2,4

La fréquence du maser est caractérisée par l'emploi d'un critère (champ magnétique modulé). Appelons H_1 le champ qui modifie la fréquence d'une valeur égale à l'entraînement de la fréquence dû à la cavité. Pour un plus grand nombre de molécules dans le jet (tableau I) la valeur de H_1 augmente. Ceci indique une détérioration de la largeur de ligne de l'ammoniac et montre l'avantage de l'emploi du $^{15}\text{NH}_3$.

Le type et la construction de la cavité doivent être soigneusement étudiés de manière que la modulation de fréquence due au champ magnétique passe effectivement par une valeur nulle. La cavité de 18 cm de longueur est du type TM_{010} .

Par suite de la présence d'une composante d'onde progressive dans la cavité, la fréquence de l'étalon dépend des conditions expérimentales. Celle-ci, toutes conditions égales, est déterminable à $\pm 2 \times 10^{-11}$.

La reproductibilité des conditions expérimentales permet une reproductibilité de la fréquence à 3×10^{-11} . On peut donc garantir une stabilité à long terme de 3×10^{-11} . L'exactitude d'un tel appareil peut être évaluée à 10^{-9} .

3. Maser à deux jets

Comme l'ont suggéré Shimoda et al. [8], l'onde progressive, présente dans la cavité d'un maser à simple jet, peut être fortement diminuée en symétrisant le phénomène à l'aide d'un second jet de direction opposée au premier. Nous avons réalisé deux installations expérimentales de maser à deux jets.

L'installation N° 1 a été construite de manière que les nombres de molécules des deux jets et les tensions appliquées aux deux jets puissent être réglés indépendamment. L'alignement des composantes est fait assez grossièrement.

L'installation N° 2 a été conçue de façon à permettre un alignement par méthode optique des composantes des deux jets. De plus, par construction, le nombre de molécules dans les deux jets, ainsi que les tensions appliquées aux focaliseurs sont identiques. Les gicleurs de l'installation N° 2 assument une directivité du jet environ 3 fois moins bonne que dans l'installation N° 1.

Dans les deux installations la cavité employée est du type TM_{010} . Le critère du champ magnétique est employé pour la mesure de fréquence. La précision de mesure est de 2×10^{-11} .

Influence des paramètres expérimentaux. — La fréquence des masers à deux jets est, à la précision de mesure près, indépendante de la haute tension appliquée aux focaliseurs (*fig. 1 b*). Par contre, la fréquence varie en fonction du nombre de molécules dans le jet (*fig. 2 a*, et tableau II).

TABLEAU II

	Variation relative de fréquence	Nombre de molécules dans le jet
Installation N° 1	$1,6 \times 10^{-10}$	10^{17} mol/s
Installation N° 2	4×10^{-11}	10^{17}

Maser à 2 jets N° 1

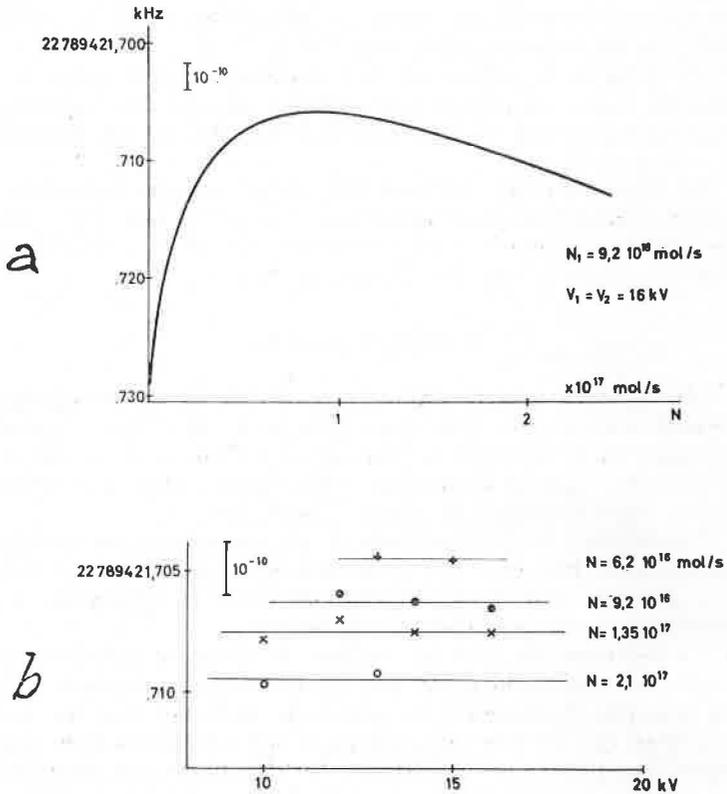


Fig. 1.

- a. Effet de l'onde progressive sur la fréquence,
 b. Influence de la haute tension sur la fréquence.

Cette variation n'est pas fonction des caractéristiques du maser. Ces caractéristiques varient en effet fortement avec la tension appliquée au sélecteur d'états, et l'expérience montre que la fréquence ne varie pas dans ces conditions.

Cette variation nous semble être proportionnelle au nombre de molécules dans la cavité; en effet (fig. 2 b) :

1° L'influence du nombre de molécules dans le jet est plus petite dans l'installation N° 2. Ceci est attribué à la plus faible directivité des gicleurs de cette installation. Le rapport entre les variations relatives de fréquence est d'ailleurs du même ordre que le rapport des directivités des deux gicleurs.

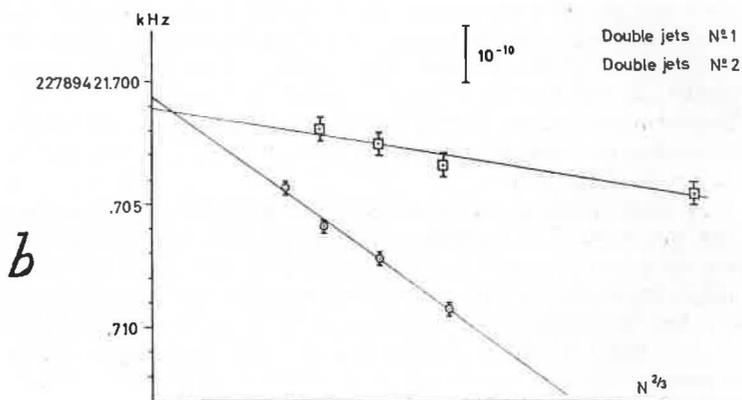
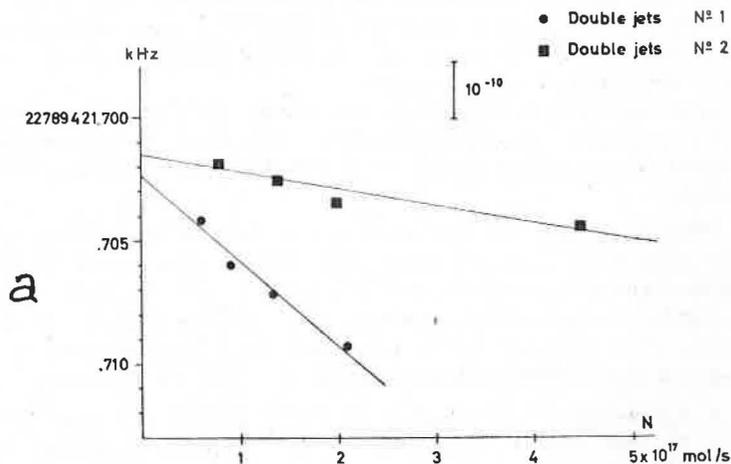


Fig. 2.

- a. Variation de la fréquence avec le nombre de molécules dans le jet.
 b. Variation de la fréquence en fonction du nombre évalué de molécules dans la cavité. Ce nombre est proportionnel à $N^{2/3}$, N étant le nombre de molécules dans le jet.

2° D'autre part, les expériences faites par Sabari et al. [9] avec des masers à deux jets, oscillant sur la raie $J = 3, K = 2$ de $^{13}\text{NH}_3$, ont montré une dépendance environ 10 à 40 fois plus forte des conditions expérimentales.

3° Le nombre de molécules dans la cavité ne varie que de deux pour cent, quand la tension appliquée au sélecteur d'états varie de 0 à 20 kV [10]. Si l'on accepte une variation de fréquence proportionnelle au nombre de molécules dans la cavité, l'effet des variations de tension dans l'installation N° 2, pour un nombre de molécules inférieur à $3 \times 10^{17} \text{ mol/s}^{-1}$ est plus petit que 10^{-11} , donc actuellement non mesurable.

Cette variation de fréquence pourrait être due à une interaction entre molécules dans la cavité. Les expériences de mesure de largeur de raie montrent qu'il y a effectivement de telles interactions.

Stabilité et exactitude des masers à deux jets. — a. Stabilité. — Les paramètres expérimentaux sont facilement mesurables et reproductibles à quelques pour cent. Cette reproductibilité des conditions expérimentales permet une reproductibilité de la fréquence à quelques 10^{-12} . L'on peut donc garantir pour un appareil une stabilité à long terme de cet ordre de grandeur.

b. Exactitude. — L'évaluation de cette grandeur est plus difficile. Si l'on retient l'hypothèse de la variation de fréquence linéaire en fonction du nombre de molécules, on peut extrapoler la fréquence pour un nombre nul de molécules dans la cavité (fig. 2 b).

Aux erreurs de mesure près, cette extrapolation conduit à des valeurs identiques des fréquences des deux masers. La valeur de la fréquence ainsi obtenue est $22\,789\,421\,701 \pm 1 \text{ Hz}$, dans l'échelle de temps TA_1 [5] ($\text{Cs} = 9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$).

Remarquons qu'une extrapolation du même type, mais pour un nombre de molécules nul dans le jet, conduit à un résultat très proche (fig. 2 a).

Une autre question est de savoir à quel point l'onde progressive a été diminuée. L'évaluation grossière qui suit peut être faite : dans un maser à simple jet, l'augmentation de 10 à 20 kV de la tension appliquée au sélecteur d'états entraîne une augmentation de l'effet de l'onde progressive de 30 % à 40 %. Comme cette influence dans le maser à deux jets est plus petite que l'erreur de mesure de 2×10^{-11} , on peut évaluer que l'effet d'onde progressive est plus petit que 10^{-10} .

En conclusion, et malgré l'incertitude sur la cause réelle de la variation de fréquence en fonction du nombre de molécules, nous croyons raisonnable de donner une exactitude meilleure que 10^{-10} pour les masers à deux jets.

II. — DÉTERMINATION D'UNE ÉCHELLE
DE TEMPS ATOMIQUE

La mesure continue de la fréquence d'une horloge à quartz à l'aide d'un étalon de fréquence, permet de calculer par intégration l'état de l'horloge. En pratique, cette mesure continue n'est pas nécessaire. Une mesure de fréquence périodique permettra le calcul d'une échelle de temps avec la précision désirée.

La fréquence de l'horloge à quartz (ν_t) est mesurée à intervalles réguliers par rapport à la fréquence de l'étalon atomique.

Entre les mesures, la fréquence est interpolée linéairement. L'intégrale

$$\Delta T_a = \int_0^t \frac{\nu_t - \nu}{\nu} dt,$$

où ν_t est la fréquence nominale du quartz, donne pour l'instant t la correction ΔT_a à appliquer à l'état TQ, en vue d'obtenir l'état en temps atomique (TA) de l'horloge :

$$TA = TQ - \Delta T_a.$$

L'interpolation linéaire de la fréquence entre les mesures entraîne une erreur sur la détermination du temps atomique. Il est possible d'évaluer celle-ci en calculant l'état de plusieurs horloges et en comparant ces états entre eux. Le tableau III donne les résultats obtenus avec les deux meilleures horloges à quartz dont nous disposons, pour les cas où les mesures sont espacées respectivement de 15 et 5 jours. Ces résultats montrent que l'erreur introduite par cette procédure est négligeable.

TABLEAU III

Période entre deux mesures	Erreur quadratique moyenne produite par l'interpolation linéaire	Erreur prévue au bout d'une année
15 jours.....	35 μ s	200 μ s (6×10^{-12})
5 jours.....	3 μ s	25 μ s (10^{-12})

Dans ces conditions, l'erreur sur l'échelle de temps atomique est donc uniquement soumise à la qualité de l'étalon de fréquence. Elle peut actuellement être évaluée à une milliseconde par an.

(Texte révisé, 8 mai 1961)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] RAMSEY (N. F.), *Molecular Beams*, Oxford, 1952.
- [2] ESSEN (L.) et PARRY (J. V. L.), *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, 1957, 250, p. 45.
- [3] HOLLOWAY (J.), MAINBERGER (W.), REDER (F. H.), WINKLER (G. M. R.), ESSEN (L.) et PARRY (J. V. L.), *Proc. Inst. Radio Engrs.*, 1959, 47, p. 1730.
- [4] BONANOMI (J.), DE PRINS (J.) et KARTASCHOFF (P.), *Comptes rendus du Congrès International de Chronométrie*, Munich, 1959.
- [5] DE PRINS (J.) et KARTASCHOFF (P.), *Scuola Internazionale di Fisica « Enrico Fermi »*, 1960 (à paraître).
- [6] KARTASCHOFF (P.), BONANOMI (J.) et DE PRINS (J.), *Helv. Phys. Acta*, 1960, 33, p. 969.
- [7] KARTASCHOFF (P.), *Bull. Ass. Suisse Électriciens*, 1960, 51, p. 1080.
- [8] SHIMODA (K.), WANG (T. C.) et TOWNES (C. H.), *Phys. Rev.*, 1956, 102, p. 1308.
- [9] Ce volume, Annexe 15, p. 104.
- [10] BARNES (F. S.), *Proc. Inst. Radio Engrs.*, 1959, 47, p. 2085.

ANNEXE 9

National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

RAPPORT SUR LES TRAVAUX DU N. P. L.

Par L. ESSEN

(Traduction)

L'étalon atomique à césium du National Physical Laboratory désigné par Cs1 a continué à servir d'étalon d'intervalle de temps sans interruption au Royaume-Uni. Un nouvel étalon à césium [1] a été construit et mis en service au cours de 1959. Ce nouvel étalon a une largeur de bande de 50 Hz et peut être utilisé avec une précision relative de 2×10^{-11} . Il a servi en 1960 et 1961 au contrôle des résultats obtenus avec Cs1, toutes les fois que d'autres recherches le permettaient. L'une de ces recherches a été la mesure de la fréquence de la séparation hyperfine du rubidium 87. La valeur obtenue [2] a été $6\ 834\ 682\ 614,0 \pm 1$ Hz.

Les émissions britanniques de fréquences étalons MSF ont été effectuées depuis mars 1959 à une fréquence décalée par rapport à celle qui correspond à la seconde de temps des éphémérides, d'une quantité connue et déclarée [3]. Simultanément, des dispositions ont été prises, en accord avec le Royal Greenwich Observatory et le British Post Office, en vue d'employer les impulsions de secondes de l'étalon MSF pour les signaux horaires de l'Observatoire. Les émissions en provenance du Royaume-Uni ont donc été fondées sur un système unique d'impulsions temporelles. Des dispositions ont été prises également [4] avec les organismes correspondants des États-Unis pour faire fonctionner les émissions de fréquences étalons à 1×10^{-10} près de leur valeur nominale, compte tenu du décalage adopté d'un commun accord, et pour ajuster les heures d'émission à ± 1 ms près. La mise en œuvre complète de ce programme est en cours.

Les émissions précédentes et quelques autres ont été utilisées pour comparer des étalons atomiques de fréquence. Les résultats préliminaires ont déjà été publiés [5]. A la suite de quelques

désaccords entre les résultats obtenus pour la valeur des étalons du Royaume-Uni et des États-Unis, une comparaison directe a été faite à Teddington entre l'étalon du National Physical Laboratory d'une part, et deux Atomichrons et un étalon expérimental, d'autre part [6]. Les résultats ont montré que, lorsqu'ils sont employés dans les mêmes conditions, les étalons sont tous en accord à $\pm 2 \times 10^{-10}$ près.

Lorsque d'autres étalons ont été mis en service, ils ont été comparés par radiotransmissions.

Les résultats confirment les conclusions tirées antérieurement [7], [8], à savoir que des étalons atomiques de fréquence peuvent être construits et mis en action sans difficulté afin de définir la fréquence et l'intervalle de temps par de simples mesures courantes avec des limites extrêmes d'incertitude de $\pm 1 \times 10^{-10}$.

(Mars 1961)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ESSEN (L.) et PARRY (J. V. L.), *Nature*, 1959, 184, p. 1791.
- [2] ESSEN (L.), HOPE (E. G.) et SUTCLIFFE (D.), *Nature*, 1961, 189, p. 298.
- [3] N. P. L., *Electronic and Radio Engineer*, 1959, 36, p. 117.
- [4] ESSEN (L.), *Nature*, 1960, 187, p. 452.
- [5] ESSEN (L.), *Astr. J.*, 1959, 64, p. 121.
- [6] HOLLOWAY (J.), MAINBERGER (W.), REDER (F. H.), WINKLER (G.M.R.), ESSEN (L.) et PARRY (J. V. L.), *Proc. I. R. E.*, 1959, 47, p. 1730.
- [7] ESSEN (L.) et PARRY (J. V. L.), *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, 1957, 250, p. 45.
- [8] ESSEN (L.), *Procès-Verbaux C. I. P. M.*, 1956, 25, p. 95.



ANNEXE 10

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Allemagne)

COMPARAISONS DES FRÉQUENCES ÉTALONS ET DÉTERMINATION DE LA FRÉQUENCE DES HORLOGES A QUARTZ DE LA P. T. B. PAR RAPPORT A CELLE DU RÉSONATEUR A CÉSIUM

Par U. ADELSBERGER et G. OHL

(Traduction remise)

Les comparaisons des cinq horloges à quartz de la P. T. B. [1], avec des étalons atomiques de fréquence d'autres pays, ont été effectuées par voie de transmission sans fil. Pour mener à bien ces comparaisons, l'émetteur de fréquences étalons allemand DCF 77 a été d'abord mis en service d'essai et dès le 1^{er} janvier 1959 en service officiel [2], [3], [4]. Les écarts de fréquence relatifs exprimés en 10^{-9} de la valeur nominale, rapportés à la résonance du césium 9 192 631 770 Hz, étaient publiés tous les deux mois (*voir* par exemple [5]). Des fréquences étalons à ondes longues et des signaux horaires à ondes courtes sont reçus pour les comparer aux horloges à quartz de la P. T. B.

En 1957, la fréquence étalon de 60 kHz, émise par l'émetteur britannique MSF, était mesurée régulièrement. Les corrections du National Physical Laboratory (N. P. L.) étaient appliquées à la valeur obtenue pour comparer les horloges à quartz de la P. T. B. avec le résonateur à césium du N. P. L. [6].

La différence de fréquence relative des horloges à quartz des grands laboratoires des États-Unis et de la Grande-Bretagne a été déterminée de mars à septembre 1958 à $(5 \pm 2) \times 10^{-10}$ en moyenne. Les comparaisons avec les émetteurs WWV (U. S. A.) et MSF (G. B.) ont été effectuées au moyen d'une antenne en losange d'une longueur de 150 m. En plus, des comparaisons internationales de fréquence ont été faites au moyen de DCF 77 entre la Harvard University et la P. T. B. Comme les deux

stations ont également reçu les émissions de WWV et de MSF, on a obtenu une comparaison entre les étalons atomiques de ces laboratoires américain et britannique et les horloges à quartz de la P. T. B. avec une concordance relative de l'ordre de 10^{-10} [7].

Les comparaisons des fréquences ont été continuées grâce à plusieurs réceptions des susdits émetteurs pendant chaque intervalle de dix jours. Entre le 1^{er} octobre 1958 et le 31 juillet 1959 il en résulta la valeur $(1 \pm 2) \times 10^{-10}$ pour l'écart relatif du résonateur à césium du N. P. L. et de ceux du N. B. S. [8].

Pour la fréquence du résonateur à césium du N. P. L., obtenue au moyen de l'émetteur britannique MSF et en considérant les corrections du N. P. L., des écarts ou variations relatifs ont été mis en évidence par les horloges à quartz de la P. T. B. pendant plusieurs mois dès octobre 1957 jusqu'en février 1958 et pendant la seconde moitié de l'année 1958. Rapportés à la fréquence de référence de la P. T. B., les écarts relatifs atteignaient 2×10^{-9} pour un temps assez long. Ces résultats ont été confirmés par des corrections appliquées, par exemple au U. S. Naval Observatory [9], [10], [11].

Pendant l'année 1960, la méthode de comparaison bien éprouvée était continuée et élargie par des comparaisons avec la Suède [12].

En conformité avec les résolutions de la 13^e Assemblée Générale de l'U. R. S. I. (Londres, 1960), nous avons commencé des comparaisons de phases en y incluant les émissions des fréquences très basses de NBA, Zone du Canal, qui est maintenu en service par le U. S. Naval Observatory.

Au moment où fut rédigé ce rapport, la P. T. B. ne disposait pas encore d'étalons atomiques. A l'avenir, les horloges à quartz seront également comparées à un Atomichron et à des étalons atomiques de fréquence de la P. T. B.

(13 mars 1961)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] SCHEIBE, ADELSBERGER (U.), BECKER (G.), OHL (G.) et SUSS, *Z. Angew. Phys.*, 1956, 8, p. 175.
- [2] ADELSBERGER (U.), *NTZ*, 1959, 12, p. 261; 1960, 13, p. 296.
- [3] OHL (G.), *NTZ*, 1959, 12, p. 37.
- [4] SÜSS, *NTZ*, 1959, 12, p. 475.
- [5] P. T. B., Abt. I, *NTZ*, 1961, 14, p. 39.
- [6] SCHEIBE, ADELSBERGER (U.) et OHL (G.), *Wiss. Abh. P. T. B.*, I : Bericht über die Tätigkeit, 1957, 9, p. 7, n° 8.
- [7] ADELSBERGER (U.) et OHL (G.), *Wiss. Abh. P. T. B.*, I : Bericht über die Tätigkeit, 1958, 10, p. 6, n° 11.

- [8] ADELSBERGER (U.) et OHL (G.), *Wiss. Abh. P. T. B.*, I : Bericht über die Tätigkeit, 1959, 11, p. 7, n° 14.
- [9] SCHEIBE, ADELSBERGER (U.), BECKER (G.), OHL (G.) et Süss, *Z. Angew. Phys.*, 1959, 11, p. 352.
- [10] OHL (G.), *Kongressberichte Internationaler Kongress für Chronometrie*, München, 1959, 1, p. 209.
- [11] ADELSBERGER (U.), BECKER (G.), OHL (G.) et Süss, *Kongressberichte Internationaler Kongress für Chronometrie*, München, 1959, 1, p. 227.
- [12] ADELSBERGER (U.) et OHL (G.), *Wiss. Abh. P. T. B.*, I : Bericht über die Tätigkeit, 1960, 12, p. 8, n° 13.

RECHERCHES SUR LE MASER A AMMONIAC

Par G. BECKER

(Traduction remise)

Le maser à ammoniac, bien connu d'après les travaux de Townes et de ses collaborateurs [1], utilise seulement des jets courts comparés à ceux du résonateur à césium. En conséquence, il est actuellement moins approprié comme étalon de fréquence primaire malgré sa supériorité en ce qui concerne sa constance instantanée. Afin d'améliorer le maser, il est nécessaire de développer des dispositifs utilisant des jets moléculaires très intenses et peu divergents. Un maser expérimental convenant à ces recherches [2] fonctionna pour la première fois vers la fin de 1960. Les données expérimentales les plus significatives de cet appareillage, qui se distingue considérablement des autres dispositifs publiés, et les résultats reçus jusqu'à présent sont exposés brièvement ci-après.

1. LE RÉSONATEUR. — On emploie un résonateur à cavité rectangulaire sur le mode E_{110} . Il est en laiton et construit suivant

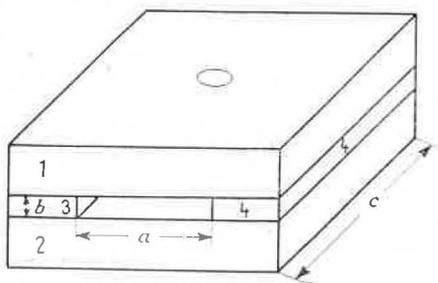


Fig. 1.

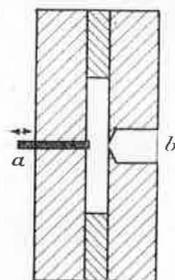


Fig. 2.

Fig. 1. — Le résonateur.

Dimensions approximatives : $a = 40$ mm, $b = 6,35$ mm, $c = 95$ mm.

Fig. 2. — Vue transversale du résonateur :

a , cheville diélectrique déplaçable ; b , découplage de la micro-onde.

la figure 1. Le résonateur est ouvert des deux côtés. La surface des plaques 1 et 2 est argentée. Un tel résonateur a l'avantage de permettre l'emploi de jets de grandes sections transversales. Un déplacement latéral des parties 3 et 4 permet facilement un accord grossier. Une variation de a de $200 \mu\text{m}$ correspond à une variation de b d'environ $1 \mu\text{m}$. L'accord précis est effectué selon la méthode de Vonbun [3] au moyen d'une cheville diélectrique déplaçable. Vis-à-vis de cette cheville se trouve l'orifice de découplage pour la micro-onde. Le facteur Q est de 3 400.

2. LA SOURCE DU JET. — Pour la production des jets moléculaires intenses on utilise avec profit de nombreux canaux parallèles (gicleurs). La directivité des gicleurs de dimensions différentes fut mesurée en fonction du courant moléculaire N [4]. Les gicleurs contenant des canaux très étroits se montrèrent relativement peu supérieurs à ceux contenant des canaux larges. Sous certaines conditions, il n'est pas nécessaire de diviser la section transversale des sources en beaucoup de canaux : il suffit de constituer la source d'un nombre de fentes relativement petit.

On a trouvé que pour des canaux dont la longueur est grande devant le libre parcours des molécules, on a $j \sim N^{1/3}$, où j est l'intensité du jet dans la direction axiale. Ce résultat est en contradiction avec une théorie de Giordmaine et Wang [5] concernant la formation des jets au moyen de longs canaux. Selon cette théorie on devrait avoir $j \sim N^{1/2}$.

Giordmaine et Wang croient que leurs mesures se rapportant aux jets moléculaires de CO_2 confirment leur théorie. Mais d'après une évaluation de l'auteur [6], ces mesures peuvent être mieux représentées par $j \sim N^{1/3}$.

La théorie de Giordmaine et Wang fut étendue [6], et on montra que pour la formation des jets non seulement la section de collision selon la théorie cinétique des gaz est importante, mais aussi la section de collision totale.

La formation des jets peut être avantageusement décrite par la notion de « longueur effective du canal ». Utilisant cette notion, les directivités de gicleurs différemment construits furent évaluées approximativement.

Hélmer et ses collaborateurs [7] supposent une influence considérable du nuage gazeux devant le gicleur sur la formation du jet. On montra [6] qu'une telle influence est généralement négligeable.

Dans le maser expérimental on utilise la source K 6 [4] : section transversale $0,5 \text{ mm} \times 26 \text{ mm}$, nombre de canaux 3 500.

3. LE FOCALISEUR. — Les focaliseurs quadrupolaires employés par Townes et ses collaborateurs [1] donnent une focalisation appelée « harmonique ». Ils ont le désavantage d'avoir besoin de

tensions électriques relativement élevées. Plusieurs auteurs préféraient donc des focaliseurs multipolaires de 8 à 32 électrodes. Mais l'influence de ces électrodes sur les molécules proches de l'axe n'est pas suffisante. Helmer et ses collaborateurs ont montré [7] que des focaliseurs seulement partiellement parallèles et convergeant ensuite vers la source du jet ont une directivité très bonne.

Le développement des focaliseurs à la P. T. B. a pris une autre direction. Pour l'application aux jets moléculaires plats on a étudié des focaliseurs selon deux méthodes différentes (*fig. 3 et 4*). Dans la figure 3 (méthode I) la trajectoire des molécules est perpendiculaire au plan du dessin.

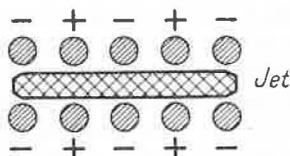


Fig. 3. — Focaliseur selon la méthode I.

La trajectoire du jet est parallèle aux fils.

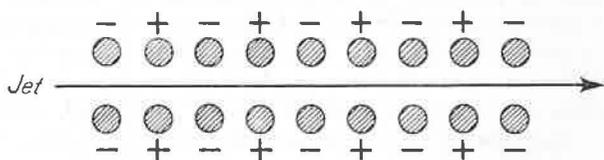


Fig. 4. — Focaliseur selon la méthode II.

La trajectoire du jet est perpendiculaire aux fils.

Le focaliseur de la figure 4 (méthode II) est particulièrement avantageux pour des raisons techniques. Les électrodes peuvent être constituées de minces fils parce que la longueur des fils n'a pas besoin d'être plus grande que la largeur du jet. L'effet de séparation des électrodes selon la méthode II est au moins aussi grand que celui des électrodes selon la méthode I.

Les recherches sur les focaliseurs d'après les deux méthodes ne sont pas encore terminées. La figure 5 montre quelques résultats d'expériences. On a représenté la tension électrique U_e nécessaire pour l'amorçage de l'oscillation du maser, constatée à une puissance du maser de 10^{-12} W, en fonction du courant moléculaire N pour deux électrodes différentes et pour quelques dispositions géométriques. La longueur effective des électrodes n'était que 10 cm. Les courbes du groupe I se rapportent au focaliseur constitué de fils de 1 mm de diamètre et distants de 1,5 mm,

et celles du groupe II au focaliseur constitué de fils de 0,5 mm de diamètre et distants de 0,5 mm. On a fait varier la distance entre les électrodes et l'angle qu'elles font entre elles. On a reconnu que des électrodes parallèles sont moins efficaces que celles qui font entre elles un petit angle. Dans ce cas, la petite distance

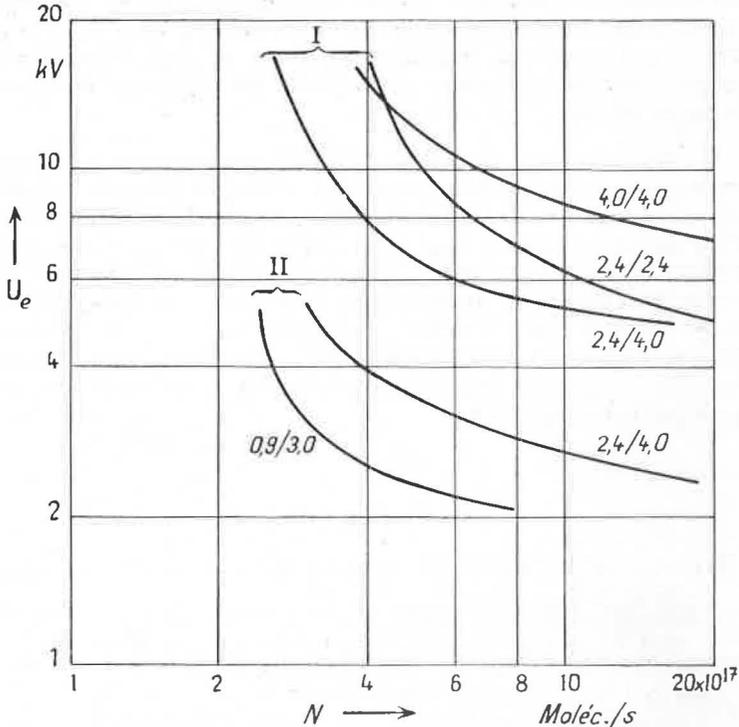


Fig. 5. — Tension électrique U_e , nécessaire pour l'amorçage de l'oscillation du maser, en fonction du courant moléculaire N . Groupe I : focaliseur selon la méthode II (fig. 4), diamètre des fils 1 mm, distance des fils 1,5 mm. Groupe II : focaliseur selon la méthode I (fig. 3), diamètre des fils 0,5 mm, distance des fils 0,5 mm. Le premier nombre de chaque courbe indique la distance entre les deux parties du focaliseur à l'entrée, et le deuxième la distance à la sortie en millimètres.

des électrodes est du côté de la source du jet et la grande distance du côté du résonateur.

On peut constater comme résultat essentiel que la séparation utilisant des fils minces est déjà presque entièrement efficace pour une tension électrique des électrodes de quelques kilovolts.

On a l'intention de réduire davantage le diamètre des fils pour obtenir l'effet de maser à des tensions encore plus faibles.

Nous sommes en train de disposer des électrodes d'après la méthode II en plusieurs couches superposées formant ainsi des focaliseurs spatiaux. Par l'emploi de fils assez minces le jet ne sera pas considérablement affaibli par les collisions avec les fils. Ces focaliseurs, ainsi que ceux des méthodes I et II, ont un effet de focalisation dans une seule direction. Nous avons l'intention d'examiner aussi des focaliseurs spatiaux à deux dimensions, qui sont formés de grilles de fils disposées par couches et chargées de façon alternée.

4. MULTIPLICATION DE LA FRÉQUENCE D'UNE HORLOGE A QUARTZ POUR LA COMPARAISON AVEC LE MASER. — Pour obtenir une harmonique proche de la fréquence du maser, on multiplie la fréquence d'une horloge à quartz (66,6 kHz) par le facteur 179 en un seul échelon à l'aide d'un procédé mis au point spécialement [8], [9], [10]. Les autres facteurs de multiplication sont 10.5.5.8. La puissance de 10^{-6} W à la bande K obtenue à l'aide d'une diode pour micro-onde ne suffit pas pour être mélangée avec le maser. Nous sommes en train d'examiner des multiplicateurs de micro-onde où l'on applique l'effet de Zener.

(18 mars 1961)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] GORDON (J. P.), ZEIGER (H. J.) et TOWNES (C. H.), *Phys. Rev.*, 1955, 99, p. 1264.
- [2] *Wiss. Abh. P. T. B.*, I : Bericht über die Tätigkeit, 1957, 9, p. 9, n° 20; 1958, 10, p. 8, n° 21; 1959, 11, p. 6, n° 7; 1960, 12, p. 7, n° 6.
- [3] VONBUN (V. O.), *Rev. Sc. Instr.*, 1961, 31, p. 900.
- [4] BECKER (G.), *Z. Angew. Phys.*, 1961, 13, p. 59.
- [5] GIORDMAINE (J. A.) et WANG (T. C.), *J. Appl. Phys.*, 1960, 31, p. 463.
- [6] BECKER (G.), *Z. Phys.*, 1961, 162, p. 290.
- [7] HELMER (J. C.), JACOBUS (F. B.) et STURROCK (P. A.), *J. Appl. Phys.*, 1960, 31, p. 458.
- [8] *Wiss. Abh. P. T. B.*, I : Bericht über die Tätigkeit, 1957, 9, p. 9, n° 19; 1958, 10, p. 8, n° 24; 1959, 11, p. 7, n° 10; 1960, 12, p. 8, n° 10.
- [9] BECKER (G.), *Frequenz*, 1958, 12, p. 97.
- [10] BECKER (G.), *Frequenz*, 1960, 14, p. 412.

ANNEXE 12

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Allemagne)

QUELQUES DISPOSITIFS DU RÉSONATEUR A CÉSIIUM DE LA P. T. B.

Par W. SCHAFFELD et H. BAYER

(Traduction remise)

Le résonateur à césium de la P. T. B., dont la construction est presque achevée, a comme récipient un tube en verre d'une longueur d'environ 4 m et d'un diamètre intérieur de 10 mm. Les deux bouts du tube sont élargis pour servir respectivement de chambre de four et de chambre de détecteur. Ce récipient a l'avantage de permettre un dégazage relativement facile de l'appareil, à tel point qu'il est possible de le sceller et de maintenir une pression résiduelle du gaz inférieure à 5×10^{-7} mm Hg pour une durée pratiquement illimitée. Pour absorber le gaz résiduel éventuellement désorbé pendant le fonctionnement, une pompe ionique a été incorporée à l'appareil. Les seules pièces métalliques se trouvant à l'intérieur du tube à jet atomique sont un système de diaphragmes derrière la chambre de four, la fente du collimateur au milieu du tube et le détecteur à ionisation. A l'aide d'un dispositif spécialement mis au point on peut ajuster avec précision le tube de l'extérieur, puis le fixer à sa position pendant le fonctionnement. Cette position est indiquée par le maximum du jet au détecteur pour le champ magnétique $H = 0$.

L'entrefer des deux aimants Stern-Gerlach pour les champs A et B est égal à 12 mm. Les électro-aimants employés jusqu'à présent permettent des intensités de champ jusqu'à 2×10^6 A. m⁻¹ environ; ils seront remplacés par des aimants permanents d'une intensité de champ moyenne d'environ 6×10^5 A. m⁻¹.

En inversant le gradient du champ B, nous avons reconnu que la sensibilité du détecteur à ionisation est suffisante.

La production de l'oscillation à haute fréquence de 9 192,631 770 MHz se fait par une multiplication et un mélange appropriés à partir d'un oscillateur à quartz de fréquence $f_0 = 4\,974\,367,841$ Hz. La fréquence reçue est induite dans un système de guides d'ondes construit symétriquement en forme de U, dont les deux branches contiennent les deux champs Ramsey. La distance des deux champs est de 1,10 m. Les atomes ayant une vitesse moyenne de $200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ environ, on peut atteindre une largeur de résonance minimum $\Delta f \approx 120$ Hz.

La stabilité de fréquence, que l'on peut atteindre au maximum par contrôle électronique, devrait être en théorie $\frac{\Delta f}{f} \approx 2 \times 10^{-11}$ environ. De petites variations de la différence de phase entre les deux champs Ramsey, se produisant éventuellement pendant le fonctionnement, peuvent être corrigées jusqu'à $0,1^\circ$ environ (correspondant à un changement de fréquence de 0,03 Hz) à l'aide d'une ligne de mesure entre les deux branches. Pour la détermination de la différence de phase elle-même, le résonateur a été construit de façon telle qu'il peut être tourné facilement de 180° sans modification des autres conditions. Les phases doivent être réglées de façon qu'une rotation de 180° ne change pas la position du centre de la résonance.

Le balayage de la résonance se fait par une modulation d'amplitude de la fréquence de sortie. Une bande latérale appropriée passe sur la résonance par variation de la fréquence de modulation. La modulation de fréquence à l'intérieur d'un échelon du multiplicateur s'est montrée moins appropriée, parce que dans ce cas la stabilité de phase dans la chaîne de multiplicateurs est réduite. Pour indiquer la résonance on emploie un détecteur à ionisation et un amplificateur à tube électromètre montés en série. La tension de réglage obtenue par un balayage de la résonance contrôle l'oscillateur fondamental et sa relation avec la fréquence atomique.

(15 mars 1961)

ANNEXE 13

Bureau International de l'Heure

TEMPS ATOMIQUE INTÉGRÉ

Par M^{me} A. STOYKO et N. STOYKO

Pour qu'on puisse admettre une seconde atomique non seulement comme étalon de fréquence, mais aussi comme étalon de temps, il faut que la précision de conservation continue pendant des années soit la plus grande possible. Étant donné qu'actuellement les résonateurs atomiques sont des étalons de fréquence, il faut, pour avoir le temps, intégrer leur fréquence en utilisant les horloges à quartz.

Nous avons pu former pour les dix premiers mois de l'année 1957 une horloge moyenne atomique intégrée d'après trois résonateurs (Neuchâtel, Teddington et Washington) et à partir de novembre 1957 d'après cinq étalons (Bagneux, Boulder, Neuchâtel, Teddington et Washington).

Nous avons rapporté tous les résultats à la seconde du système A₁ qui correspond à 9 192 631 770 oscillations du résonateur à césium au champ magnétique zéro.

Dans le tableau I nous donnons, exprimés en dix-millièmes de seconde, les écarts, de 6 en 6 mois, pour cinq étalons atomiques par rapport à leur moyenne. Les résultats sont rapportés au milieu du mois.

TABLEAU I

	Bagneux	Boulder	Neuchâtel	Teddington	Washington
1957 janvier	-	-	+46	-101	+55
juillet	-	-	+72	-143	+71
1958 janvier	-13	- 5	+11	+ 16	-10
juillet	+19	-59	+16	+ 54	-31
1959 janvier	+ 4	-17	+ 8	+ 18	-12
juillet	+15	-22	+22	- 4	-12
1960 janvier	+45	-36	-23	+ 21	- 6

On remarque des écarts systématiques dans les corrections de divers étalons, surtout en 1957, bien que nous ayons pris pour le 1^{er} janvier 1958 toutes les corrections égales à zéro. On remarque, de plus, une marche progressive qui peut provenir, soit des corrections approchées utilisées pour réduire les fréquences atomiques à la fréquence A₁ (le plus souvent on a utilisé les corrections en arrondissant la fréquence à 1×10^{-10}), soit d'erreurs d'étalonnage.

Pour éliminer ces écarts systématiques, nous avons représenté les corrections de chaque étalon par la formule

$$\Delta T_{ij} = a_i + m_i t_j,$$

où l'indice *i* correspond au nom de l'étalon et *j* au mois correspondant; *t_j* est le temps compté en mois à partir du 1^{er} janvier 1958. Nous avons trouvé les valeurs suivantes (tableau II) pour la période 1958-1960 (27 mois).

TABLEAU II

	Bagnoux	Boulder	Neuchâtel	Teddington	Washington
<i>a_i</i>	— 8	— 38	+ 31	+ 44	— 29 × 10 ⁻⁴ s
<i>m_i</i>	(1) + 17	+ 6	— 16	— 16	+ 10 × 10 ⁻⁵ s/mois
	(2) — 0,65	— 0,21	+ 0,62	+ 0,61	— 0,39 × 10 ⁻¹⁰
	(3) ± 0,09	± 0,15	± 0,13	± 0,15	± 0,05
Δf_c	+ 0,60	+ 0,19	— 0,57	— 0,56	+ 0,36 Hz

(1) valeur de *m_i*; (2) variation mensuelle de fréquence en valeur relative; (3) erreur probable.

Δf_c , correction de la fréquence A₁ d'après chaque étalon.

Pour les Atomichrons, nous avons les fréquences suivantes : Bagnoux (9 192 631 839,20), Boulder (838,19) et Washington (838,36). Pour ramener ces Atomichrons à la seconde A₁, il fallait les corriger respectivement de 75,06, 74,21 et 74,39 × 10⁻¹⁰.

On voit que l'écart moyen systématique d'un étalon atomique par rapport à la moyenne générale est égal à 0,48 × 10⁻¹⁰ pour les années 1958-1960. L'intégration de la fréquence ayant cet écart systématique donne au bout de deux années un écart égal à 0,003 s. Il faut, pour garantir 0,001 s en temps intégré au bout de 3 ans, que la fréquence de l'étalon atomique soit définie au point de vue systématique à 1×10^{-11} près.

Les écarts moyens mensuels de la détermination du temps, d'après l'étalon moyen atomique, sont respectivement

1957	0,64 ms ($2,4 \times 10^{-10}$),
1958	0,30 ms ($1,1 \times 10^{-10}$),
1959	0,15 ms ($0,6 \times 10^{-10}$).

On remarque une augmentation de la précision de l'horloge atomique moyenne pendant les trois années indiquées. L'augmentation de la précision de comparaison des étalons atomiques par radio, ainsi que l'amélioration des horloges à quartz, nous permettent d'espérer qu'on arrivera assez vite à la précision exigée pour le temps atomique intégré.

(5 avril 1961)

ANNEXE 14

Nautical Almanac Office, Royal Greenwich Observatory
(Royaume-Uni)

LA DÉTERMINATION
DE LA SECONDE DE TEMPS DES ÉPHÉMÉRIDES

Par D. H. SADLER

(Traduction)

1. *Observations.* — Les observations de la position de la Lune ont été poursuivies à l'Observatoire Royal de Greenwich, avec la caméra lunaire de Markowitz, jusqu'à la fin de 1960.

Le programme d'occultations a été suivi. Les corrections d'irrégularité de bord relatives aux occultations observées en 1958 nous ont été obligeamment fournies par C. B. Watts, avant la publication de ses cartes étendues des bords de la Lune. L'analyse des occultations réduites, ainsi corrigées, indique que l'erreur probable interne d'une seule observation a été réduite d'environ $0",6$ à $0",3$.

2. *Théorie du mouvement de la Lune.* — La détermination du Temps des Éphémérides repose sur les points suivants :

a. évaluation, à partir de l'examen de toutes les observations enregistrées, de la longitude moyenne de la Lune en fonction du Temps des Éphémérides (T. E.);

b. développement d'une théorie gravitationnelle précise du mouvement de la Lune et calcul d'une éphéméride;

c. observation de la position de la Lune et comparaison avec l'éphéméride;

d. correction des déterminations du T. E. qui en résultent, selon les changements dans l'éphéméride provenant de la substitution des constantes réelles aux valeurs adoptées.

Il est improbable que l'on puisse améliorer nettement la précision du point (a) pendant plusieurs années. La théorie de Brown relative au point (b) est certainement aussi bonne que le permettent les observations s'étendant sur de courtes périodes et elle est en cours de révision et d'amélioration par W. J. Eckert. La disponibilité des corrections de bord permet d'espérer un important accroissement de la précision des observations d'occultation; elle accroîtra certainement la précision des observations au moyen de la caméra lunaire, mais sans doute pas de la même quantité. Les déterminations récentes du champ gravitationnel de la Terre, à partir des observations des satellites artificiels, suppriment la principale cause d'incertitude du point (d).

Pour les besoins pratiques, disons pour une précision de 10^{-9} , la détermination de la seconde (de T. E.) est limitée par la précision des observations (c); pour des précisions supérieures les limitations imposées par les points (a) et (b) peuvent devenir importantes.

(27 mars 1961)

RÉSUMÉ DES TRAVAUX
SUR LE MASER A JET D'AMMONIAC,
ÉTALON ATOMIQUE
DE FRÉQUENCE A LA STATION JJY

Note des Radio Research Laboratories, Tokyo, Japon

(Traduction)

Deux masers à ammoniac ont été construits aux Radio Research Laboratories; l'un utilise la radiation $J = 3, K = 3$ de $^{14}\text{NH}_3$ et sert d'étalon atomique de fréquence à JJY (émetteur de fréquence étalon au Japon); l'autre est à double jet et utilise la radiation $J = 3, K = 2$ de $^{14}\text{NH}_3$; il est présentement à l'étude et fournira dans un proche avenir une exactitude plus élevée.

Maser à radiation 3-3 de $^{14}\text{NH}_3$. — La variation de la fréquence de référence avec les paramètres, qui est produite principalement par la structure hyperfine de la radiation $J = K = 3$, a été étudiée expérimentalement par la méthode des sauts utilisant une cavité sur un mode d'ordre plus élevé. Ces expériences ont montré que la fréquence de référence déterminée par cette méthode a une bonne précision, d'environ $\pm 2 \times 10^{-10}$ sous certaines conditions.

Afin d'éprouver la stabilité de fréquence à long terme, des mesures de comparaison ont été faites avec la fréquence de JJY depuis octobre 1959; les résultats ont été comparés également à la fréquence étalon des États-Unis au moyen des signaux horaires WWVH. Il est montré que la fréquence se maintient bien constante à ± 2 à 3×10^{-10} près et que la fréquence de référence est 23 870 128 809 Hz par rapport à la fréquence adoptée aux États-Unis de 9 192 651 770 Hz. Cette précision est suffisamment élevée pour servir pratiquement à la correction de la fréquence de JJY. Les mesures de détermination des corrections ont été faites depuis juillet 1960, généralement deux

fois par semaine, afin de maintenir la fréquence de JJY à 5×10^{-9} près au voisinage d'une fréquence constante, de 15×10^{-9} plus basse que celle qui est déterminée par la fréquence de référence de notre maser mentionné précédemment. (Voir pour plus de détails les références [1] et [2].)

Maser à radiation 3-2 de $^{14}\text{NH}_3$. — Dans le but de produire un étalon atomique de fréquence plus stable, nous avons étudié un maser à radiation 3-2 depuis l'automne de 1960. L'influence du changement des paramètres sur la fréquence de référence du maser à radiation 3-2 est beaucoup plus petite, car la radiation 3-2 n'a pas de structure hyperfine quadrupolaire. Cependant, l'effet d'onde progressive qui change la fréquence de référence subsiste encore, comme l'a montré K. Shimoda [3].

En conséquence, nous avons construit un maser à double jet afin de réduire l'influence de cette onde progressive, et aussi de renforcer l'oscillation qui est plus faible dans un maser à radiation 3-3.

Nos expériences montrent que la tension d'amorçage des oscillations diminue de moitié environ lorsqu'on passe du simple jet au double jet, et que la variation de la fréquence de référence due à un changement de 20 % de la pression d'ammoniac et de la tension de focalisation est inférieure à 2×10^{-10} . On se sert de l'effet Zeeman pour déterminer la fréquence de référence, dont la précision est à présent 5×10^{-11} . D'après le résultat de plusieurs mesures, nous estimons que la fréquence de notre maser à radiation 3-2 est 22 834 185 021 Hz par rapport à la fréquence 23 870 128 810 Hz de notre maser à radiation 3-3 [4].

Nous poursuivons notre programme orienté vers un contrôle plus exact de ces propriétés du maser à radiation 3-2, dont l'exactitude devrait être, selon nos prévisions, environ dix fois meilleure que celle du maser à radiation 3-3.

(Mars 1961)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] SABURI (Y.) et KOBAYASHI (M.), *J. Radio Res. Lab.*, 1960, 7, n° 33, p. 425.
- [2] IJIMA (S.) et SABURI (Y.), *Publ. Astron. Soc. Japan*, 1960, 12, n° 3, p. 445.
- [3] SHIMODA (K.), *Quantum Electronics*, Columbia Univ. Press, New York, 1960, p. 25.
- [4] Les résultats seront publiés dans *J. Radio. Res. Lab.*

LE MASER A RADIATION $J = 3, K = 2$
DE L'AMMONIAC,
UTILISÉ COMME ÉTALON DE FRÉQUENCE

Par K. SHIMODA

Département de Physique, Faculté des Sciences,
Université de Tokyo

(Traduction)

On a étudié à la fois théoriquement [1] et expérimentalement [2] l'effet de la structure hyperfine non résolue sur la fréquence d'un maser utilisant la raie $J = 3, K = 3$ de $^{14}\text{NH}_3$. On a montré que le centre de la raie d'un tel maser ne peut pas être déterminé avec une reproductibilité meilleure que $\pm 1 \times 10^{-8}$.

Parmi les raies d'inversion de $^{14}\text{NH}_3$, seule la raie $J = 3, K = 2$ n'a pas de structure hyperfine due au moment quadrupolaire de ^{14}N . On a construit et étudié deux masers utilisant la raie $J = 3, K = 2$ de l'ammoniac.

La réalisation de l'appareil est semblable à celle qui a été précédemment décrite [2], mais le focaliseur est refroidi par de l'air liquide contenu dans un piège et non en circulation comme dans le modèle antérieur. La figure 1 en montre une vue en coupe. Le focaliseur à huit pôles est constitué de fils d'acier de 3 mm de diamètre et 40 cm de longueur; le diamètre de la région soumise au champ focalisant est 10 mm. La source du jet est constituée d'un faisceau de canaux de 1 mm de diamètre. Le résonateur est une cavité cylindrique de 12 cm de longueur fonctionnant sur le mode TM_{010} ; elle est fendue longitudinalement pour permettre un « accord thermique » au moyen d'un fil de tungstène, comme l'indique la figure 2. L'orifice de couplage a un diamètre d'environ 2,1 mm afin d'accroître la valeur du Q en charge dont la mesure donna presque 9 000. Les trous d'entrée et de sortie du jet ont 8 mm de diamètre et 10 mm de longueur.

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX. — Le maser commence à osciller sur la raie $J = 3, K = 2$, lorsque la tension du focaliseur atteint un seuil d'environ 5,6 kV, ceci après deux ou trois heures de

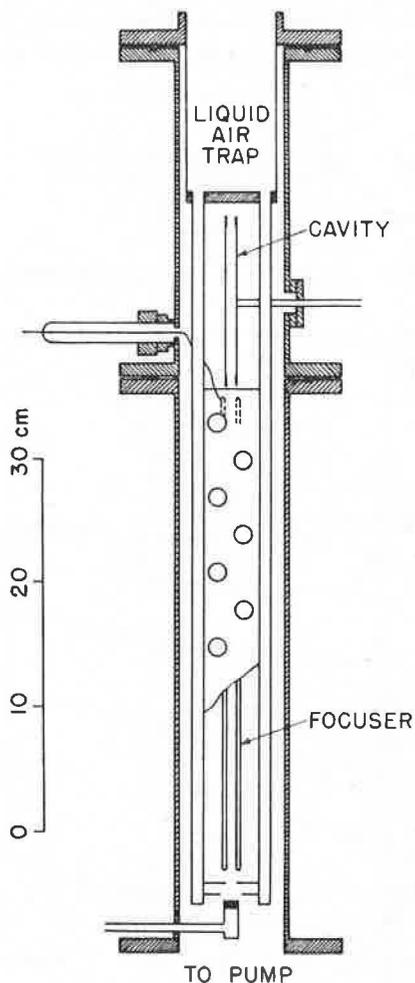


Fig. 1. — Coupe du maser utilisant la raie $J = 3, K = 2$.

fonctionnement. Ce seuil décroît d'abord au cours du temps après l'établissement du jet d'ammoniac, puis il croît après plusieurs heures de fonctionnement.

La variation de fréquence de la raie $J = 3, K = 2$ fut mesurée par battements avec un autre maser semblable. Le résultat est

donné à la figure 3 où chaque courbe correspond à un accord différent de la cavité. En comparant avec la figure 11 de la référence [2] relative à la raie $J = 3, K = 3$, on trouve que la raie $J = 3, K = 2$ permet une définition plus précise de la fréquence centrale. Toutefois, il semble difficile de déduire de ces résultats le centre de la raie avec une précision meilleure que $\pm 1 \times 10^{-9}$.

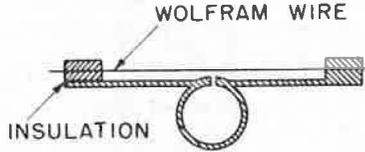


Fig. 2. — Accord thermique de la cavité.

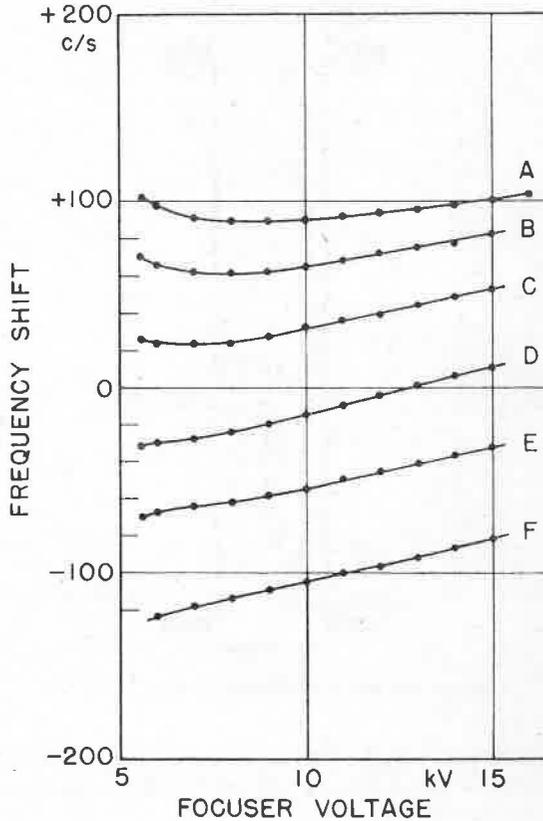


Fig. 3. — Variation de la fréquence (Hz) en fonction de la tension du focaliseur (kV).

On a mesuré la variation de fréquence due à l'accroissement de la pression dans le réservoir pour des valeurs de celle-ci comprises entre 3×10^{-7} mm Hg et 1×10^{-5} mm Hg. On a trouvé que la variation de fréquence est proportionnelle à l'entraînement de fréquence par la cavité, $f - f_0$, où f_0 est la fréquence centrale de la raie et f la fréquence d'oscillation pour $p = 0$. On obtient ainsi l'équation empirique suivante donnant en hertz la variation de fréquence Δf_p produite par une pression de p mm Hg dans le réservoir

$$(1) \quad \Delta f_p = 2 \times 10^4 (f - f_0) p.$$

Ce type de variation de fréquence peut s'expliquer par la diminution de l'amplitude de l'oscillation due à une réduction par diffusion du débit du jet. Lorsque la cavité est grossièrement accordée de sorte que $f - f_0 < 30$ Hz, la pression normale de fonctionnement de 5×10^{-7} mm Hg produit une variation de fréquence inférieure à 0,3 Hz. Ce type de déplacement de fréquence est donc négligeable.

Un autre type de variation de fréquence est produit par l'effet Stark dû au champ électrique parasite du focaliseur. On estime que la variation par effet Stark est beaucoup plus petite que l'effet

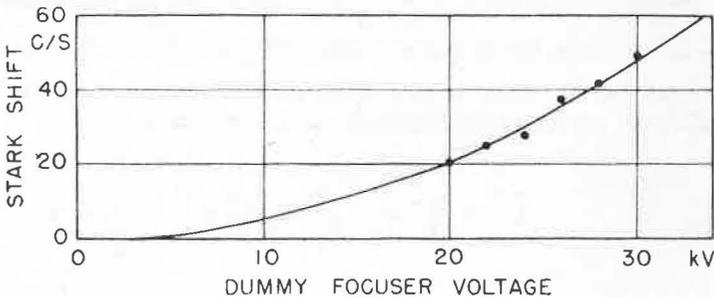


Fig. 4. — Variation de la fréquence (Hz) due au champ périphérique du focaliseur inactif (kV).

d'onde progressive, mais elle a été mesurée en utilisant un focaliseur inactif placé à 3 mm de la cavité. La figure 4 montre la variation de fréquence observée en fonction de la tension du focaliseur inactif; la variation est proportionnelle au carré de la tension comme prévu. Puisque le focaliseur du jet était en fait environ à 7 mm de la cavité, on a estimé à + 3 Hz la variation par effet Stark pour une tension du focaliseur de 15 kV. Cette variation sera diminuée si on installe un diaphragme formant écran entre la cavité et le focaliseur.

EFFET D'ONDE PROGRESSIVE. — L'entraînement de fréquence dû à l'accord de la cavité doit être symétrique par rapport à la fréquence centrale; en conséquence, l'effet d'onde progressive pourrait expliquer l'accroissement de la fréquence de l'oscillation avec la tension du focaliseur [2], [3].

Dans la référence [3] on calculait l'effet d'onde progressive pour une cavité portant à son extrémité le guide d'onde de sortie. Maintenant le guide d'onde est couplé au milieu de la longueur de la cavité. Dans ce cas, on calcule comme suit le déplacement de fréquence.

L'énergie emmagasinée dans la cavité est proportionnelle à

$$\frac{Q}{\omega} \int_0^L \sin \frac{2\theta Z}{L} dZ,$$

où

$$\theta = \left[(\omega - \omega_0)^2 + \left(\frac{E\mu}{h} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \frac{L}{2v},$$

Q étant le facteur de qualité et L la longueur de la cavité. La puissance émise entre $\theta = 0$ et $\frac{L}{2}$ se déplace suivant la direction des Z croissants, tandis que celle émise entre $Z = \frac{L}{2}$ et L se déplace en sens opposé. Ainsi le flux d'énergie dans la direction des Z croissants est approximativement proportionnel à

$$\int_0^{\frac{L}{2}} \sin \frac{2\theta Z}{L} dZ - \int_{\frac{L}{2}}^L \sin \frac{2\theta Z}{L} dZ.$$

La valeur effective de Q correspondant à la composante progressive de l'onde peut alors s'exprimer par

$$(2) \quad Q_l = \frac{4Q \int_0^L \sin \frac{2\theta Z}{L} dZ}{\int_0^{\frac{L}{2}} \sin \frac{2\theta Z}{L} dZ - \int_{\frac{L}{2}}^L \sin \frac{2\theta Z}{L} dZ} = 4Q(1 + \sec \theta),$$

relation où intervient un facteur 4 puisque la longueur moyenne du trajet de l'onde progressive est $\frac{L}{4}$.

Alors, d'après l'équation (55) de la référence [3], la variation de fréquence s'exprime par la formule

$$(3) \quad \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} = \frac{\pi}{2Q} \frac{L^2}{Q_l \lambda^2} \left[1 - \frac{\theta \sin^2 \theta}{2\theta - \sin^2 \theta} \right] \frac{\cos \theta}{1 + \cos \theta},$$

où le Q de la raie a la valeur $Q_l = \frac{\omega}{2\pi} \frac{L}{\nu}$. Le facteur entre crochets ne change pas de signe lorsque θ varie, mais le dernier facteur change de signe.

Puisque θ peut être calculé à partir de l'équation (3.10) de la référence [1] en fonction de la tension du focaliseur, l'équation ci-dessus permet d'évaluer la variation de fréquence.

Prenons $Q_l = 5 \times 10^6$, $Q = 9000$, $L = 12$ cm et $\lambda = 1,3$ cm, ce qui correspond à la raie $J = 3$, $K = 2$; la variation de fréquence calculée est alors représentée par la courbe de la figure 5.

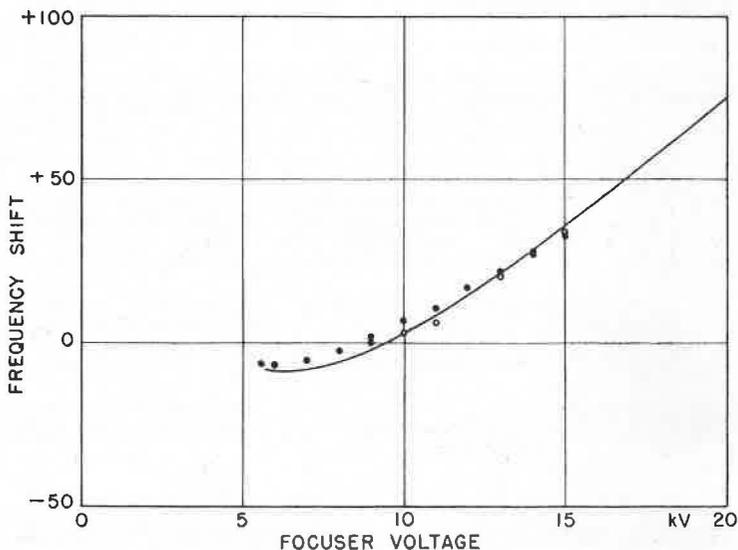


Fig. 5. — Influence de l'onde progressive.

Dans ce calcul on suppose que la tension de seuil est 5,6 kV. La variation de fréquence observée en fonction de la tension du focaliseur peut s'obtenir à partir des courbes C et D de la figure 3. Les valeurs observées représentées par des points noirs dans la figure 5 concordent très bien avec les valeurs théoriques.

Les fréquences centrales observées, obtenues en accordant la cavité pour chacune des diverses tensions du focaliseur par la

Le changement de fréquence dans un champ magnétique de 4 Oe est égal à 0,8 à 1,2 fois le changement de fréquence dû à l'entraînement par la cavité, pour un champ nul. En raison de la combinaison des effets d'onde progressive et d'entraînement, la cavité ne peut pas être accordée à un point tel qu'il n'y ait aucune variation de fréquence avec l'accroissement du champ magnétique. En un point d'accord voisin de l'optimum, la fréquence d'oscillation croît d'environ 2 à 3 Hz quand le champ varie de 2 à 3 Oe, puis décroît lorsque le champ magnétique augmente.

Lorsque la pression de la source et la tension du focaliseur sont maintenues constantes à 10 % près, l'exactitude de la fréquence du maser est meilleure que $\pm 1 \times 10^{-10}$. La fréquence des horloges à quartz et la fréquence étalon de l'émetteur JJY ont été comparées au maser à raie J = 3, K = 2 une fois par semaine depuis janvier 1961. En raison des fluctuations à courte période des oscillateurs à quartz et de la précision limitée des comparaisons de fréquence, l'écart-type pour une mesure qui dure une seconde est $1,7 \times 10^{-9}$; il est donc $1,0 \times 10^{-10}$ pour une mesure durant 5 minutes.

Les détails de l'appareil et les résultats expérimentaux seront publiés par ailleurs. La structure hyperfine magnétique et l'effet Zeeman de la raie J = 3, K = 2 ont aussi été étudiés avec une résolution améliorée, la largeur de raie étant 1,7 kHz. Ces résultats feront l'objet de rapports ultérieurs.

(Mars 1961)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] SHIMODA (K.), *J. Phys. Soc. Japan*, 1957, 12, p. 1006.
- [2] SHIMODA (K.), *J. Phys. Soc. Japan*, 1958, 13, p. 939.
- [3] SHIMODA (K.), WANG (T. C.) et TOWNES (C. H.), *Phys. Rev.*, 1956, 102, p. 1308.
- [4] HELMER (J. C.), *J. Appl. Phys.*, 1957, 28, p. 212.

DÉVELOPPEMENT D'UN ÉTALON ATOMIQUE

Par M. BOELLA

La construction d'un étalon atomique de fréquence au césium se trouve dans un état très avancé à l'I. E. N. [1].

L'appareil est un simple résonateur destiné à mettre en fréquence un étalon intermédiaire à quartz oscillant sur environ 6 MHz. La fréquence de celui-ci (6,304 960 062 MHz) a été choisie de façon que le rapport total de multiplication soit le produit des seuls facteurs simples deux et trois (2×3^6).

Pour comparer l'étalon intermédiaire et les étalons primaires à 100 kHz, on utilisera un synthétiseur de fréquence qui est en construction et on exécutera les opérations suivantes :

$$50 \times 100 + \frac{1}{2} \times 2 \ 500 + \frac{1}{2} \times 100 + \frac{1}{2} \times 9 \\ + \frac{1}{2} \times (1 - 0,1) \text{ kHz} = 6 \ 304,950 \text{ kHz.}$$

Cette fréquence diffère donc de celle du quartz de seulement 10 Hz environ, qui seront mesurés par un compteur électronique.

Le multiplicateur de fréquence par 2×3^6 est déjà terminé et on a trouvé que la fluctuation (jitter) de phase est de quelques hertz [2].

La construction de la chambre à vide contenant le faisceau atomique est avancée, tandis que tous les essais préliminaires (tenue de vide, uniformité et valeurs du champ magnétique [3], compensation des variations extérieures) ont été effectués. Les résultats en sont très satisfaisants, de sorte qu'on peut maintenant compter sur une pleine réussite de la construction. On espère mettre l'étalon en service dans le cours de cette année.

(Mars 1961)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BOELLA (M.), Costruzione di un campione di frequenza al cesio presso l'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, *La Ricerca Scientifica*, 1959, 29, n° 2, p. 267-271.
 - [2] ZITO (G.), Microwave generators for the I. E. N. caesium standard, *Bull. A. S. E.*, 1960, 51, n° 20, p. 1075-1079.
 - [3] GIACHINO (G.), Misure di campo magnetico nel corso dell'attuazione di un campione di frequenza al cesio, *Atti Accad. Sc. Torino*, 1959-1960, 94.
- GIACHINO (G.), Magnetometro elettronico con alta sensibilità (à paraître dans *Alta Frequenza*).

ANNEXE 18

Istituto Elettrotecnico Nazionale « Galileo Ferraris » (Italie)

ÉTALONS ET COMPARAISONS DE FRÉQUENCES ET D'INTERVALLES DE TEMPS A L'I. E. N. DE 1957 A 1960

Par C. EGIDI

Pendant ces quatre années on a fait des progrès considérables dans la production et la comparaison des fréquences et des intervalles de temps.

Les étalons à quartz, d'une fréquence nominale de 100 kHz, sont situés avec leurs thermostats dans une salle souterraine à température pratiquement constante; cette température présente une variation naturelle annuelle de 3,2 deg, avec une variation maximale de 0,03 deg/jour en janvier et août et une variation minimale de 0,004 deg/jour en mars et octobre.

Les trois meilleurs des cinq étalons en fonction ont une stabilité à longue période de quelques unités de 10^{-9} et ils sont retouchés environ une fois tous les vingt jours pour en corriger la dérive qui est de l'ordre de 2×10^{-10} par jour [1].

Les comparaisons entre les étalons locaux sont faites avec un phasemètre enregistreur à 100 kHz [2] qui permet l'évaluation de la phase à quelques degrés près; si on rapporte cette incertitude au jour, on trouve que $3,11^{\circ}$ /jour correspond à 1×10^{-12} sur la fréquence.

Les comparaisons des signaux horaires locaux avec les signaux reçus en ondes courtes et longues ont été améliorées par l'emploi d'un comparateur qui permet la détermination rapide et la lecture oscillographique de la milliseconde, tandis que le dixième de milliseconde est aisément apprécié ou bien mesuré si nécessaire [3].

Une horloge complètement électronique, qui est en service continu depuis plusieurs mois, produit des impulsions très précises

ayant la stabilité des étalons primaires et avec des cadences comprises, au choix, entre 1 s et 12 h.

Pour les études sur l'utilisation des signaux horaires, on a construit un formeur très souple qui peut donner les signaux normaux de la seconde constitués par une fréquence variable entre 400 et 1 000 Hz et ceux de la minute, continus ou bien interrompus [4].

Pour ce qui concerne la dégradation de précision produite par la propagation, les expériences précédentes [5] sur la réception oscillographique des signaux ont été poursuivies avec enregistrement photographique des formes d'onde dans le cadre du programme de l'U. R. S. I.

Quant aux émissions étalons de IBF, on projette de les étendre à toute la journée, en décalant la porteuse selon les avis du C. C. I. R. pour réduire les interférences mutuelles. Dans ce but, on a en construction un synthétiseur de fréquence. Les émissions susdites sont actuellement régulièrement reçues et enregistrées par le B. I. H., le Royal Greenwich Observatory et l'Observatoire de Neuchâtel.

L'Institut, de son côté, publie chaque mois la table des écarts des signaux reçus en les référant à ses signaux propres.

Depuis 1957 on a commencé l'étude et la construction d'un étalon primaire de fréquence au césium; cet étalon est maintenant dans un état très avancé (voir Annexe 17) et on espère pouvoir le mettre en service cette année.

Les liaisons avec les Observatoires astronomiques ont été renforcées; une ligne téléphonique de 5 km environ envoie avec continuité les impulsions étalonnées à l'Observatoire de Pino Torinese, tandis qu'un câble hertzien, avec un répéteur intermédiaire, envoie les mêmes signaux à Milan-Brera (distance de 150 km environ). Toutefois, les observations astronomiques ne sont pas encore utilisées dans la correction des émissions IBF.

Sur la propagation des signaux horaires dans les lignes physiques on a fait une analyse étendue et on a trouvé des résultats intéressants, surtout en vue de corriger à l'avance la déformation subie par les signaux [6].

(Mars 1961)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BOELLA (M.), Studio della deriva dei campioni di frequenza a quarzo dell' Istituto Elettrotecnico Nazionale, *Atti Accad. Sc. Torino*, 1958-1959, 93.
- [2] ZITO (G.), Confronto di fase continuo tra campioni di frequenza, *Alla Frequenza*, apr. 1959, 28, p. 100-118.

- [3] RONCALLI (G.), Comparatore di segnali di tempo, *Alla Frequenza*, dic. 1960, 29, p. 708.
- [4] ANGELOTTI (E.), Formatore di segnali di tempo campione, *Alla Frequenza*, dic. 1960, 29, p. 708-718.
- [5] BOELLA (M.) et EGIDI (C.), Misure del tempo di propagazione di segnali di tempo campione, *Alla Frequenza*, 1955, 24, p. 309-338.
- [6] Cette étude fait l'objet d'une « Tesi di laurea » en préparation au Politecnico di Torino.

ANNEXE 19

Institut d'État des Mesures et Instruments de Mesure,
Kharkov (U. R. S. S.)

NOTE SUR LES MASERS

Par L. D. BRYZGEV, A. J. LEYKINE
et M. D. SAPELNIKOV

Les masers, fonctionnant sur la raie 3-3 de l'ammoniac, ont été mis en exploitation dans le service horaire de l'U. R. S. S. au mois de février 1958. Depuis cette époque, deux générateurs sont comparés régulièrement entre eux et avec l'horloge à quartz fondamentale du Service horaire. Les comparaisons, à peu d'exceptions, s'effectuent quotidiennement.

Pour garantir la constance de la fréquence reproduite par les masers, les résonateurs des générateurs étaient réglés avant chaque comparaison de manière à obtenir le minimum de variations de fréquence lors de la modification de la pression de l'ammoniac à l'entrée du système.

La pression variait automatiquement de 10 à 20 % avec une fréquence de 0,5 à 1 Hz.

En même temps, la pression moyenne dans la chambre des générateurs était établie de manière à obtenir l'intensité maximale des oscillations.

La tension sur les condensateurs quadripôles était maintenue constante et égale à 35 kV. Une modification de la tension de 10 % changeait la fréquence d'environ 1×10^{-10} .

La comparaison du générateur à quartz de l'horloge fondamentale avec les masers s'effectue par un générateur à quartz auxiliaire ayant une fréquence de 3,1 MHz.

Pendant la comparaison simultanée de la fréquence du générateur auxiliaire avec les fréquences du maser et du générateur à quartz fondamental, l'erreur de la fréquence du générateur auxiliaire s'élimine.

Les résultats de la comparaison montrent que la valeur moyenne quadratique de la différence des valeurs de fréquence obtenues avec deux masers est inférieure à $\pm 5 \times 10^{-10}$, ce qui correspond à l'erreur du réglage de chaque générateur, environ $\pm 3 \times 10^{-10}$.

Il faut noter que la somme algébrique des différences en valeur relative est égale à 4×10^{-11} pour la période d'une année. Ceci indique une bonne concordance des valeurs de fréquence moyennes déterminées avec deux masers réglés d'après la méthode indiquée.

La détermination de la fréquence des masers dans le système du temps universel T. U. 2 s'effectuait par le traitement des données citées dans le bulletin du Service horaire de l'U. R. S. S. (« Temps étalonné ») et de la réception des signaux horaires de l'émetteur GBR-10 (Angleterre) en employant les bulletins de l'Observatoire de Greenwich.

Pour une période de deux années du 25 février 1958 au 25 février 1960, les résultats suivants ont été obtenus :

d'après les données du Service horaire de l'U. R. S. S. la fréquence moyenne de deux masers est égale à 23 870 129 374 Hz;

d'après les données du Service horaire anglais elle est de 23 870 129 371 Hz.

La différence entre ces résultats est d'environ 1×10^{-10} en valeur relative.

En employant les tables du bulletin de l'Observatoire de Greenwich pour le passage au temps atomique correspondant à la fréquence 9 192 631 770 Hz de l'étalon à césium, on obtient 23 870 129 008 Hz.

(10 avril 1961)

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

2^e Session (1961)

	Pages.
NOTE	2
Avertissement historique.....	5
Liste des Membres	7
Ordre du Jour	10
Procès-verbal de la première séance, mardi 11 avril 1961.....	11
Hommage aux membres décédés.....	11
État des études sur les étalons atomiques de fréquence (Exposé de Mr Decaux. Discussion).....	12
Travaux du L. S. R. H. sur l'étalon à césium et les masers à ammo- niac à simple et à double jet. Discussion.....	13
Expériences et projets sur le résonateur à rubidium et sur le maser à hydrogène atomique. Discussion.....	15
Procès-verbal de la deuxième séance, mardi 11 avril 1961.....	17
Comparaisons des étalons atomiques de fréquence. Temps atomique. (Comparaisons des étalons dans un même laboratoire et par transmissions radioélectriques entre plusieurs laboratoires; précisions obtenues; influence de la propagation des ondes radioélectriques. Expériences de la P. T. B. Rapport du B. I. H.)	17
Détermination de la seconde de Temps des Éphémérides.....	22
Procès-verbal de la troisième séance, mercredi 12 avril 1961.....	24
Temps atomique (<i>suite</i>) (Discussion sur sa détermination et sur les différentes échelles de temps).....	24
<i>Recommandation 1</i> (Poursuite des études en vue d'améliorer l'exactitude des étalons atomiques de fréquence).....	27
<i>Recommandation 2</i> (Poursuite et extension des comparaisons des fréquences et des échelles de temps; diffusion des résultats).....	28
<i>Recommandation 3</i> (Intention de proposer une nouvelle définition de l'unité de temps à la Douzième Conférence Générale des Poids et Mesures).....	29

	Pages.
Deuxième Rapport du Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde au Comité International des Poids et Mesures; par B. Decaux.....	31
 Annexes	
1. <i>Le maser à hydrogène atomique; par N. F. Ramsey.....</i>	43
U. S. NAVAL OBSERVATORY (États-Unis d'Amérique) :	
2. <i>Définition, détermination et conservation de la seconde; par W. Markowitz.....</i>	45
3. <i>La fréquence du césium déduite d'observations récentes avec la caméra lunaire; par W. Markowitz et R. G. Hall.....</i>	52
4. <i>Lettre de G. M. Clemence.....</i>	55
NATIONAL BUREAU OF STANDARDS, BOULDER LABORATORIES (États-Unis d'Amérique) :	
5. <i>Les étalons atomiques de fréquence au N. B. S.; par J. M. Richardson, R. E. Bechler, R. C. Mockler et R. L. Fey.....</i>	57
6. <i>Méthodes et techniques de contrôle des ondes kilométriques et myriamétriques aux Boulder Laboratories; par A. H. Morgan et D. H. Andrews.....</i>	68
7. OBSERVATOIRE DE NEUCHÂTEL (Suisse). — <i>Rapport sur la comparaison d'étalons atomiques de fréquence.....</i>	73
8. LABORATOIRE SUISSE DE RECHERCHES HORLOGÈRES. — <i>État des travaux sur les étalons atomiques de fréquence; par J. de Prins, P. Kartaschoff, C. Menoud et J. Racine.....</i>	78
9. NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (Royaume-Uni). — <i>Rapport sur les travaux du N. P. L.; par L. Essen.....</i>	87
PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (Allemagne) :	
10. <i>Comparaisons des fréquences étalons et détermination de la fréquence des horloges à quartz de la P. T. B. par rapport à celle du résonateur à césium; par U. Adelsberger et G. Ohl.....</i>	89
11. <i>Recherches sur le maser à ammoniac; par G. Becker.....</i>	92
12. <i>Quelques dispositifs du résonateur à césium de la P. T. B.; par W. Schaffeld et H. Bayer.....</i>	97
13. BUREAU INTERNATIONAL DE L'HEURE. — <i>Temps atomique intégré; par M^{me} A. Stoyko et N. Stoyko.....</i>	99
14. NAUTICAL ALMANAC OFFICE (Royaume-Uni). — <i>La détermination de la seconde de Temps des Éphémérides; par D. H. Sadler.....</i>	102
15. <i>Résumé des travaux sur le maser à jet d'ammoniac, étalon atomique de fréquence à la station JJY; Note des Radio Research Laboratories, Tokyo.....</i>	104
16. <i>Le maser à radiation J = 3, K = 2 de l'ammoniac, utilisé comme étalon de fréquence; par K. Shimoda.....</i>	106

	Pages.
ISTITUTO ELETTROTECNICO NAZIONALE (Italie) :	
17. <i>Développement d'un étalon atomique</i> , par M. Boella.....	114
18. <i>Étalons et comparaisons de fréquences et d'intervalles de temps à l'I. E. N. de 1957 à 1960</i> , par C. Egidi.....	116
19. INSTITUT D'ÉTAT DES MESURES ET INSTRUMENTS DE MESURE (U.R.S.S.). <i>Note sur les masers</i> ; par L. D. Bryzgev, A. J. Leykine et M. D. Sapelnikov.....	119



PARIS. — Imprimerie GAUTHIER-VILLARS & C^{ie}.
55, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS.

160161-62

Dépôt légal, Imprimeur, 1962, n° 1510.

Dépôt légal, Éditeur, 1962, n° 1062.

ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 10 SEPTEMBRE 1962

Imprimé en France.