

**COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE**  
**SESSION DE 1963**

---



COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

---

COMITÉ CONSULTATIF  
POUR  
LA DÉFINITION DE LA SECONDE

---

3<sup>e</sup> SESSION — 1963  
(3-5 décembre)



PARIS  
GAUTHIER-VILLARS & C<sup>ie</sup>  
IMPRIMEUR-ÉDITEUR DU BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES  
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 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;
- de sanctionner les résultats des nouvelles déterminations métrologiques fondamentales et les diverses résolutions scientifiques de portée internationale;
- d'adopter les décisions importantes concernant l'organisation et le développement du Bureau International.

Le Comité International est composé de dix-huit membres appartenant à des États différents; il se réunit au moins une fois tous les deux ans. Le bureau de ce Comité adresse aux Gouvernements des États membres de la Convention du Mètre, un *Rapport Annuel* sur la situation administrative et financière du Bureau International.

Limitées à l'origine aux mesures de longueur et de masse et aux études métrologiques en relation avec ces grandeurs, les activités du Bureau International ont été étendues aux étalons de mesure électriques (1927), photométriques (1937) et des radiations ionisantes (1960). Dans ce but, un agrandissement des premiers laboratoires construits en 1876-1878 a eu lieu en 1929 et deux nouveaux bâtiments ont été construits en 1963 pour les laboratoires de la Section des radiations ionisantes.

---

(1) Au 31 décembre 1963, trente-neuf 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, République Arabe Unie, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Vénézuéla, Yougoslavie.

Devant l'extension des tâches confiées au Bureau International, le Comité International a institué depuis 1927, sous le nom de *Comités Consultatifs*, des organes destinés à le renseigner sur les questions qu'il soumet, pour avis, à leur examen. Ces Comités Consultatifs sont chargés de coordonner les travaux internationaux effectués dans leurs domaines respectifs et de proposer des recommandations concernant les modifications à apporter aux définitions et aux valeurs des unités, en vue des décisions que le Comité International est amené à prendre directement ou à soumettre à la sanction de la Conférence Générale pour assurer l'unification mondiale des unités de mesure.

Les Comités Consultatifs ont un règlement commun (*Procès-Verbaux C. I. P. M.*, 31, 1963, p. 97). Chaque Comité Consultatif, dont la présidence est généralement confiée à un membre du Comité International, est composé d'un délégué des grands Laboratoires de métrologie et des Instituts spécialisés dont la liste est établie par le Comité International, ainsi que de membres individuels désignés également par le Comité International. Ces Comités tiennent leurs sessions à des intervalles irréguliers; ils sont actuellement au nombre de six :

1. Le *Comité Consultatif d'Electricité*, 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*.

---

---

**Comité International des Poids et Mesures**

<i>Secrétaire</i>	<i>Vice-Président</i>	<i>Président</i>
J. DE BOER	L. E. HOWLETT	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 honoraire de l'Observatoire de Paris,  
*Paris.*

*Président par intérim*

H. BARRELL, Membre du Comité International des Poids et Mesures;  
Superintendent, Standards Division, National Physical Laboratory,  
*Teddington.*

*Membres*

LABORATOIRES

PHYSIKALISCH - TECHNISCHE BUNDESANSTALT [P.T.B.], *Braunschweig*  
(U. ADELSBERGER, Direktor; G. BECKER, Oberregierungsrat).

DEUTSCHES AMT FÜR MESSWESEN [D.A.M.], *Berlin* (W. KEMNITZ).

- NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [N.B.S.], *Boulder* (J. M. RICHARDSON, Chief, Radio Standards Laboratory; R. C. MOCKLER, Chief, Atomic Frequency and Time Standards Section).
- CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES [N.R.C.], *Ottawa* (J. T. HENDERSON, Principal Research Officer).
- CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES DES TÉLÉCOMMUNICATIONS [C.N.E.T.], *Bagneux* (B. DECAUX, Chef du Département Fréquences).
- LABORATOIRE DE L'HORLOGE ATOMIQUE DU CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE, *Besançon* (A. KASTLER, Directeur).
- ISTITUTO ELETTROTECNICO NAZIONALE « GALILEO FERRARIS » [I.E.N.], *Torino* (M. BOELLA, Consulente di Ricerca).
- NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY [N.R.L.M.], *Tokyo* (T. TAKO, Principal Research Officer).
- NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [N.P.L.], *Teddington* (L. ESSEN, Deputy Chief Scientific Officer).
- LABORATOIRE SUISSE DE RECHERCHES HORLOGÈRES [L.S.R.H.], *Neuchâtel* (P. KARTASCHOFF, Chef du Département des Étalons de Fréquence).
- INSTITUT SCIENTIFIQUE DES MESURES PHYSICOTECHNIQUES ET RADIO-TECHNIQUES DE L'U.R.S.S., *Moscou* (V. SATCHKOV, Chef de Section; A. OBOUKHOV, Ingénieur).
- RADIO RESEARCH LABORATORIES, *Tokyo* (H. UYEDA).

ORGANISATIONS ET ÉTABLISSEMENTS ASTRONOMIQUES

- UNION ASTRONOMIQUE INTERNATIONALE (W. MARKOWITZ et N. STOYKO).
- BUREAU INTERNATIONAL DE L'HEURE, *Paris* (N. STOYKO, Chef des Services).
- ASTRONOMISCHES RECHEN-INSTITUT, *Heidelberg* (T. LEDERLE, Astronome).
- U. S. NAVAL OBSERVATORY, *Washington D. C.* 20 390 (W. MARKOWITZ, Director, Time Service Division).
- COMMONWEALTH OBSERVATORY OF AUSTRALIA, *Canberra*.
- INSTITUT D'ASTRONOMIE THÉORIQUE, *Leningrad*.
- OBSERVATOIRE ASTRONOMIQUE DE TOKYO, *Mitaka* (H. HIROSE).
- NAUTICAL ALMANAC OFFICE, Royal Greenwich Observatory, *Hailsham* (D. H. SADLER, Superintendent).

INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE MARINA, *San Fernando* (A. ORTE, Chef du Service de l'Heure).

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

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

MEMBRES NOMINATIVEMENT DÉSIGNÉS

J. FUCHS, Direktor der Universitätssternwarte, *Innsbruck*.

J. A. PIERCE, Harvard University, *Boston, Mass.*

L. RANDIC, Doyen de la Faculté de *Zagreb*.

F. ZAGAR, Directeur de l'Observatoire Astronomique de *Milan*.

Le représentant du BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES (J. TERRIEN, Directeur).

*Invité*

N. F. RAMSEY, Professor of Physics, Harvard University, *Cambridge, Mass.*

---

## ORDRE DU JOUR DE LA SESSION

---

1. Compte rendu des expériences effectuées sur les étalons atomiques depuis la session 1961.
  2. Comparaisons d'étalons de fréquence dans un même laboratoire et par radiotransmissions.
  3. Comparaisons des échelles de temps atomiques.
  4. Détermination de la seconde de Temps des Éphémérides.
  5. Conditions générales d'un changement de définition de la seconde :
    - a.* précision et reproductibilité des étalons atomiques;
    - b.* continuité avec la définition actuelle;
    - c.* besoins propres à l'astronomie;
    - d.* temps atomique et temps universel.
  6. Recommandations à formuler.
  7. Questions diverses.
-

COMITÉ CONSULTATIF  
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

---

5<sup>e</sup> SESSION (1965)

---

RAPPORT

AU

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

par B. DECAUX, Rapporteur

---

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde a tenu sa troisième session au Pavillon de Breteuil, à Sèvres, les mardi 3, mercredi 4 et jeudi 5 décembre 1963.

Étaient présents : Mr BARRELL, Président par intérim ; MM. ADELBERGER, BECKER, BOELLA, BONANOMI, DECAUX, ESSEN, HENDERSON, KARTASCHOFF, KASTLER, LEDERLE, MARKOWITZ, MOCKLER, OBOUKHOV, ORTE, RANDIC, RICHARDSON, SADLER, SATCHKOV, STOYKO, TAKO, TARDI, TERRIEN, ZAGAR.

Invité : Mr RAMSEY.

Mr Danjon, actuellement souffrant, n'ayant pu assurer la présidence de cette session, le Comité International des Poids et Mesures a demandé à l'un de ses membres, Mr Barrell, de bien vouloir accepter la présidence par intérim. Le Comité Consultatif exprime à Mr Danjon ses souhaits sincères de rétablissement.

A l'ouverture de la session, Mr VIEWEG, Président du Comité International des Poids et Mesures, qui assiste à la première séance, souligne l'importance des problèmes étudiés par le Comité Consultatif et exprime l'espoir que les discussions pourront aboutir à de fructueuses décisions.

L'ordre du jour proposé par le Président est adopté.

Mr Decaux est désigné comme Rapporteur, assisté de Mr Carré (Bureau International) comme Secrétaire.

**Compte rendu des expériences effectuées sur les étalons atomiques  
et comparaisons d'étalons dans un même laboratoire  
et par radiotransmissions**

(*Annexes 1, 2, 3, 4, 8, 10, 11*)

Les délégués commentent les travaux effectués depuis la dernière session (1961) et ajoutent diverses considérations sur l'état actuel des recherches.

*National Physical Laboratory (Royaume-Uni), (Annexe 1).*

D'après l'expérience acquise au N.P.L., les appareils à jet de césium présentent un léger avantage sur ceux à jet de thallium, en particulier en raison de leur fréquence plus basse. Mr ESSEN signale que le long tube à césium du N.P.L. (qui sert de base à toutes les émissions étalons du Royaume-Uni) possède une stabilité et une reproductibilité de l'ordre de  $1 \times 10^{-11}$ . Il permet de définir la raie de résonance à  $2$  ou  $3 \times 10^{-11}$  près, et c'est avec une précision de cet ordre que peut être évalué l'accord entre plusieurs étalons du même type réalisés indépendamment dans divers laboratoires.

Si la seconde était définie par rapport à cette transition, il serait facile ultérieurement de lui raccorder une définition basée sur une autre transition. On peut espérer que la reproductibilité du maser à hydrogène atomique atteindra  $1 \times 10^{-12}$ , celle du maser à ammoniac étant d'environ  $1 \times 10^{-10}$ .

*U.S. Naval Observatory (États-Unis), (Annexe 2).*

Les masers à hydrogène atomique, étudiés par paires dans divers laboratoires, ont montré une stabilité relative de l'ordre de  $1 \times 10^{-12}$  qui pourrait être portée ultérieurement à  $10^{-13}$ . La valeur de leur fréquence a été déterminée par rapport au système de fréquence du Naval Observatory avec une erreur probable de  $\pm 0,005$  Hz.

Mr MARKOWITZ rappelle que les premières comparaisons d'étalons atomiques au moyen des émissions sur ondes myriamétriques, effectuées par J. A. Pierce, L. Essen et leurs collaborateurs, avaient une erreur probable de  $10^{-10}$ ; les mesures actuelles sont précises à quelques  $10^{-11}$  près. Un émetteur tel que Panama NBA présente une stabilité sur plusieurs semaines de l'ordre de  $1 \times 10^{-11}$ , et les mesures effectuées sur des intervalles de 24 heures dans huit laboratoires permettent des comparaisons à  $1 \times 10^{-11}$  près.

Le système de radionavigation Loran C, dont la station maîtresse est pilotée par un étalon à rubidium, permet de comparer des fréquences à  $1 \times 10^{-12}$  en 24 heures. Sa stabilité sur deux semaines atteint quelques  $10^{-12}$  soit, en temps, quelques microsecondes.

Les comparaisons effectuées ont montré que pendant l'année 1963 les trois étalons du N.P.L., du N.B.S. et du L.S.R.H. ont généralement été en bon accord entre eux. Au cours de certains mois des écarts dépassant  $5 \times 10^{-11}$  se sont manifestés. Les Atomichrons présentent souvent des écarts systématiques.

*Union Radioscientifique Internationale, (Annexe 3).*

MR ADELSBERGER souligne que ce document ne fournit pas de renseignements particuliers. Constatant que les étalons atomiques peuvent définir une unité de temps avec une précision de l'ordre de  $10^{-11}$ , l'U.R.S.I. insiste fortement sur l'utilité d'adopter une telle définition.

*Varian-Bomac Laboratories (États-Unis), (Annexe 4).*

Des comparaisons ont été poursuivies sur une paire de masers à hydrogène atomique durant 69 jours, par enregistrement continu des battements avec une mesure toutes les heures. Un écart maximal de  $2,5 \times 10^{-12}$  a été constaté, lié à des influences magnétiques accidentelles. Des fluctuations ont été également attribuées à des variations de la température ambiante. Dans l'ensemble, les écarts n'ont pas dépassé  $1 \times 10^{-12}$  et, pendant 45 jours, l'écart quadratique moyen atteint à peine  $5 \times 10^{-13}$ .

*Harvard University (États-Unis), (Annexe 8).*

Ce document concerne également le maser à hydrogène atomique.

MR RAMSEY commente les Annexes 4 et 8 et rend compte des plus récents résultats obtenus. Il souligne d'abord que l'appareil a l'avantage d'être un générateur et non un résonateur; sa très faible puissance ( $10^{-12}$  W) n'est pas un inconvénient grave. Les diverses causes d'erreurs dans la détermination de la raie sont les suivantes :

1. Valeur du champ magnétique. Le déplacement pour un champ de  $100 \mu\text{Oe}$  <sup>(1)</sup> est de l'ordre de  $10^{-10}$ , mais il peut être évalué à mieux que 1 % près.

2. L'effet Doppler du second ordre est d'environ  $4 \times 10^{-11}$ ; il peut être calculé à 1 % près.

3. Déplacement dû à l'effet des parois du ballon (où les atomes demeurent de 1 à 3 secondes): environ  $2 \times 10^{-11}$ . On peut aussi le déterminer à 1 % près en étudiant la variation de fréquence en fonction du diamètre du ballon. Des revêtements plus favorables sont à l'essai.

4. Entraînement de fréquence dû au désaccord de la cavité. Cet entraînement, pour un désaccord donné, est proportionnel à la largeur

---

(1)  $1 \text{ Oe} = \frac{1}{4\pi} \times 10^3 \text{ A/m}$ .

de la raie, elle-même fonction du flux du jet d'atomes. On règle l'accord à la valeur pour laquelle la fréquence devient indépendante de ce flux; on peut apprécier ainsi 2 à  $3 \times 10^{-13}$ . Lorsque la cavité est mal réglée, la température influe sur la fréquence.

En résumé, on peut corriger les diverses causes de variation à 5 ou  $10 \times 10^{-13}$  près. Il a été possible de régler indépendamment deux masers à hydrogène de telle manière que leurs fréquences coïncident à  $10^{-12}$  près. On peut espérer que prochainement (peut-être dans un ou deux ans) cette incertitude sera repoussée à  $10^{-13}$ ; les méthodes permettant cette amélioration sont déjà connues.

On peut espérer un fonctionnement continu de 3 à 5 ans avec des systèmes de maintien du vide simplifiés.

*National Bureau of Standards (États-Unis), (Annexe 10).*

Chacun des deux étalons à jet de césium du N.B.S. est stable à  $1 \times 10^{-11}$  près; l'écart entre les deux s'est maintenu inférieur à  $1,6 \times 10^{-11}$  au cours des trois dernières années, malgré de nombreux travaux effectués sur les appareils et l'emploi de servo-mécanismes. L'influence du champ magnétique transversal a pu être ramenée de  $5 \times 10^{-12}$  à  $2 \times 10^{-13}$ . Un étalon à thallium a fourni une précision de  $2 \times 10^{-11}$ ; celle-ci pourrait être prochainement portée à 1 ou  $2 \times 10^{-12}$ .

Mr RICHARDSON expose les résultats statistiques de comparaisons à distance, portant sur une période de 18 mois, entre les étalons des divers laboratoires. L'analyse statistique a séparé la variance due aux étalons atomiques de celle due aux autres sources, avec une sensibilité de mesure de quelques  $10^{-11}$  peut-être. Chacun des huit étalons concordait avec leur moyenne générale à mieux que  $2 \times 10^{-10}$  pour la période de 18 mois et les trois étalons du type laboratoire à mieux que  $1 \times 10^{-10}$ . Il y eut, d'année en année, une amélioration progressive.

*Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères et Observatoire de Neuchâtel (Suisse), (Annexe 11).*

La précision du résonateur à césium du L.S.R.H. a été améliorée et poussée jusqu'à environ  $5 \times 10^{-12}$ , en particulier grâce à l'inversion des cavités résonnantes.

Des études sont en cours sur un maser à hydrogène atomique.

Le résonateur à thallium de l'Observatoire de Neuchâtel a présenté un écart d'environ  $6 \times 10^{-11}$ ; les améliorations, en particulier dans le système magnétique, laissent espérer une précision de  $10^{-12}$ .

Dans les comparaisons d'étalons au moyen des émissions en ondes myriamétriques, il serait possible d'éliminer les irrégularités dues aux appareillages et à la propagation (erreurs sur la phase de 2 à  $3 \mu s$ ), en opérant sur des intervalles de plus de 24 heures. La comparaison au moyen des signaux horaires fournit d'excellents résultats sur de longs intervalles.

### Comparaison des échelles atomiques de temps

(Annexes 3, 6, 10, 11)

L'exposé ci-dessous comprend, comme le précédent, à la fois le résumé des documents présentés et le compte rendu des exposés oraux.

*Union Radioscientifique Internationale, (Annexe 3).*

L'U.R.S.I. recommande d'établir des échelles atomiques nationales de temps, de les comparer pour relier leurs origines entre elles, et de poursuivre la surveillance de leurs écarts résiduels.

*Bureau International de l'Heure, (Annexe 6).*

Mr ΣΤΟΥΚΟ commente les résultats obtenus au B.I.H. sur l'intégration du temps atomique depuis 1955. Depuis 1958 l'intégration est plus sûre, parce que les étalons utilisés sont plus nombreux (8 ou 9); la précision s'améliore progressivement. Les origines d'intégration diffèrent légèrement d'un Observatoire à l'autre, en raison des différences de détermination de l'heure. En comparant les échelles atomiques de temps, on constate entre les résultats de Greenwich, de Washington et du B.I.H. des différences systématiques de 1 à 3 ms, soit 0,6 à  $2 \times 10^{-11}$  sur la fréquence, pour un intervalle de cinq années. En 1963 les échelles du N.P.L., du N.B.S. et du L.S.R.H. sont restées pratiquement en accord.

Mr ESSEN remarque que la précision sur le temps atomique intégré est meilleure que celle avec laquelle on peut se référer individuellement à la raie du césium.

*National Bureau of Standards (États-Unis), (Annexe 10).*

La comparaison des échelles de temps atomique intégré à Boulder et à Neuchâtel a montré que sur une période de dix-huit mois le taux de divergence a été environ  $1 \times 10^{-11}$ , correspondant à un écart de fréquence de même valeur. La précision de mesure des signaux horaires utilisés était plus que suffisante pour permettre une telle comparaison.

*Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères, (Annexe 11).*

Le temps atomique a pu être conservé avec une grande sécurité depuis six ans; l'écart maximal a été de 9 ms. La précision des échelles atomiques de temps est ainsi meilleure que celle des échelles astronomiques.

### Détermination de la seconde de temps des éphémérides

Mr SALDER expose les difficultés de ces déterminations, déduites de l'observation des mouvements de la Lune par rapport aux étoiles. En

réalité on n'observe pas le centre de gravité de la Lune, mais son limbe dont les irrégularités introduisent des erreurs. Les études faites à ce sujet au Naval Observatory de Washington ont été mises en application avec succès au Royal Observatory de Hertsmonceux; l'erreur quadratique moyenne a été déterminée, mais les erreurs systématiques n'ont pas encore été analysées. Les astronomes travaillent sur des intervalles de temps considérablement plus longs que ceux des physiciens et les progrès sont plus lents. Il faudra encore plusieurs années avant de bénéficier des améliorations en cours. Mr MARKOWITZ souligne qu'en 1958 l'incertitude sur la détermination du Temps des Éphémérides était de l'ordre de  $3 \times 10^{-9}$  et que, dans quelques années, elle pourrait être ramenée à  $1 \times 10^{-9}$ .

### Conditions générales d'un changement de définition de la seconde

(Annexes 1, 2, 3, 5, 9, 10, 11)

Les discussions portent sur le principe même d'un changement de définition et sur les modalités pratiques d'un tel changement.

L'Annexe 5 du Bureau des Longitudes (France), commentée par Mr TARDI, souligne ces divers aspects, sans aborder toutefois le choix de telle ou telle transition. Le principe d'une nouvelle définition de la seconde est favorablement envisagé, mais on devrait au préalable faire une étude approfondie de l'influence des divers paramètres extérieurs sur la fréquence obtenue pratiquement dans un étalon atomique, et les comparaisons directes des différents étalons. De plus, il semblerait prudent de n'adopter une transition que si elle permet d'espérer une précision de l'ordre de  $10^{-11}$ . Les physiciens s'intéressent aux intervalles de temps. Les astronomes s'intéressent aux dates ou époques; ils seront heureux de bénéficier des progrès acquis dans la conservation du temps, mais ne pourront se contenter du seul temps atomique intégré. Le Temps des Éphémérides devrait être conservé concurremment, les deux systèmes de temps devant être comparés sans discontinuer. Si les physiciens et les astronomes perfectionnent respectivement leurs déterminations et leurs comparaisons, on aura un remarquable moyen de vérifier si la constante de la gravitation et celle de Planck conservent leurs valeurs.

La discussion met en évidence l'importance attachée par les astronomes à la notion d'époque et ses relations avec l'unité d'intervalle de temps. Il est facile de mesurer des différences d'époques, mais les astronomes étudient des intervalles énormément plus longs que ceux des physiciens. Depuis cinq ans, on a choisi implicitement une époque origine pour l'intégration du temps atomique, mais elle n'a pas fait l'objet d'une définition officielle; certains délégués pensent qu'il faudrait le faire, d'autres estiment que la définition de la seconde ne doit pas affecter le choix d'une époque.

Mr le PRÉSIDENT, rappelant la Résolution 10 de la Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures, souligne que la Douzième Conférence Générale se réunira en 1964 et non en 1966. Il est probable que la réunion suivante se tiendra en 1968. Il semble évident que tout le monde est d'accord sur le principe d'une définition atomique de la seconde, qui d'ailleurs est utilisée officieusement depuis plusieurs années. Le problème pratique posé au Comité Consultatif est donc le suivant : le Comité peut-il dès maintenant proposer une nouvelle définition officielle et précise, ou bien vaut-il mieux attendre le développement des recherches en cours? D'autre part, faut-il abroger entièrement la définition actuelle basée sur le Temps des Éphémérides, ou bien les astronomes peuvent-ils continuer à l'utiliser?

Ces deux questions font alors l'objet d'une longue discussion au cours de laquelle sont exposés les principaux arguments pour ou contre l'adoption immédiate d'une nouvelle définition. On peut les résumer comme suit :

### 1. Arguments pour une adoption immédiate.

a. La différence de précision entre la détermination astronomique et la détermination atomique d'une unité d'intervalle de temps est énorme et ira en s'accroissant. En dehors des astronomes, les utilisateurs ne peuvent disposer de la seconde de T.E. que par l'intermédiaire d'étalons atomiques qui seuls leur sont accessibles. Ces étalons atomiques sont déjà d'un usage courant. Les physiciens ne peuvent donc continuer à se contenter de la définition actuelle; de plus les astronomes bénéficieraient de la précision d'une nouvelle définition.

b. Les progrès acquis dans la mise en œuvre de l'étalon à césium sont tels qu'il est possible de rendre officiel son emploi actuel, admis officieusement mais en réalité illégal.

c. Lorsqu'une nouvelle transition meilleure sera susceptible d'être choisie, le rapport entre sa fréquence et celle du césium sera facilement déterminé, et le changement n'offrira aucune difficulté.

d. Si on attend des améliorations des étalons, il s'en produira toujours de nouvelles, la décision sera retardée indéfiniment et l'on restera dans la même situation qu'après la session de 1961 de ce Comité Consultatif.

### 2. Arguments contre une adoption immédiate.

a. Il est illogique de choisir une transition en ce moment même où nos connaissances sur les étalons atomiques sont en pleine évolution. Il n'y a pas d'inconvénient à différer la décision de quelques années pour voir plus clairement quelle est la transition la meilleure pour servir de base à une nouvelle définition.

b. Si l'on adoptait une transition à titre provisoire, le changement ultérieur, que chacun admet comme pratiquement certain, aurait beaucoup

d'inconvénients sur le plan pratique et légal comme l'a montré ce qui s'est passé pour l'utilisation de l'angström. De plus il est fâcheux de changer trop souvent de définition.

c. Le choix officiel, même provisoire, du césium risquerait de rendre plus difficile l'obtention de crédits de recherches pour les laboratoires qui se sont consacrés à l'étude du thallium ou de l'hydrogène.

D'autre part il est apparu, au cours de cette discussion, que la valeur 9 192 631 770 Hz attribuée au césium et universellement utilisée depuis plusieurs années doit être conservée dans le cas de l'adoption immédiate d'une nouvelle définition; dans le cas d'une adoption différée, la nouvelle définition, même fondée sur une autre transition, devra être en concordance avec cette valeur, quel que soit le résultat des déterminations futures du temps des éphémérides.

Mr le PRÉSIDENT demande alors aux délégués d'indiquer leurs préférences. Sept sont favorables à une définition précise immédiate, douze étant d'avis d'attendre avant de choisir une transition. Cette consultation n'indiquant pas une tendance très nettement marquée, il est décidé de charger un groupe de travail, composé de MM. Decaux (président), Adelsberger, Bonanomi, Markowitz et Richardson assistés de Mr Terrien, de rédiger un projet de recommandation.

Après examen des divers aspects du problème, le groupe de travail trouve plus sage de présenter au Comité Consultatif deux projets de recommandation reflétant respectivement les deux tendances manifestées au cours de la discussion générale. Après un premier examen de ces projets par le Comité, diverses retouches leur sont apportées; finalement, les deux projets suivants sont soumis au choix du Comité.

### *Projet A*

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

#### CONSIDÉRANT

le désir unanime d'une définition atomique de l'unité d'intervalle de temps;

les progrès rapides qui peuvent être obtenus à bref délai à la suite des études en cours sur les étalons atomiques ou moléculaires de fréquence utilisant par exemple le césium, l'hydrogène ou le thallium;

#### RECOMMANDE

1° que soit maintenue la définition de la seconde adoptée en 1956 par le Comité International des Poids et Mesures et ratifiée en 1960 par la Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures, jusqu'à la mise au point des étalons atomiques ou moléculaires de fréquence en cours d'étude;

2° que les laboratoires nationaux et internationaux experts dans ce domaine poursuivent les études entreprises sur les étalons atomiques et moléculaires de fréquence en vue d'aboutir à une définition de l'unité d'intervalle de temps basée sur une transition entre deux niveaux d'énergie d'un atome ou d'une molécule;

3° que soit employée, à titre de référence de travail, la fréquence de la transition entre les niveaux hyperfins  $F = 4$ ,  $M_F = 0$  et  $F = 3$ ,  $M_F = 0$  de l'état fondamental  ${}^2S_{1/2}$  de l'atome de césium 133 non perturbé par des champs extérieurs, fixée provisoirement à 9 192 631 770 hertz.

*Projet B*

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

CONSIDÉRANT

le désir unanime d'une définition atomique de l'unité d'intervalle de temps;  
les progrès acquis dans l'utilisation des étalons atomiques de fréquence à césium;

RECOMMANDE

1° que la seconde, unité de base du Système International d'Unités pour l'intervalle de temps, soit définie comme la durée d'un nombre spécifié de périodes d'une radiation correspondant à une transition spécifiée entre deux niveaux d'énergie d'un atome ou d'une molécule;

2° que, pour le moment, la seconde soit définie comme la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux hyperfins  $F = 4$ ,  $M_F = 0$  et  $F = 3$ ,  $M_F = 0$  de l'état fondamental  $^2S_{1/2}$  de l'atome de césium 133 non perturbé par des champs extérieurs;

3° que la définition de la seconde adoptée en 1956 par le Comité International des Poids et Mesures et ratifiée en 1960 par la Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures soit utilisée, sous l'appellation de seconde des éphémérides, seulement pour les besoins de la mécanique céleste, et abrogée pour les autres usages;

MAIS CONSIDÉRANT d'autre part

que des progrès rapides peuvent être obtenus à la suite des études en cours sur d'autres transitions atomiques et moléculaires, telles que celles de l'hydrogène et du thallium, et qu'il est facile de comparer leur fréquence avec une haute précision;

RECOMMANDE

1° que les laboratoires nationaux et internationaux experts dans ce domaine poursuivent les études entreprises sur les étalons atomiques et moléculaires de fréquence en vue d'améliorer la définition de l'unité d'intervalle de temps;

2° que le Comité International des Poids et Mesures demande à la Conférence Générale le pouvoir de remplacer dans la définition, avant la Treizième Conférence Générale des Poids et Mesures, la transition spécifiée du césium par une transition atomique ou moléculaire qu'il estimerait nettement préférable.

Dans une discussion engagée sur l'ensemble de ces deux projets certains délégués souhaitent que, lors du choix d'une transition autre que celle du césium, la valeur correspondante de la fréquence soit comprise à l'intérieur des limites d'incertitude de celle du césium, et ne conduise pas à changer la valeur attribuée à la fréquence du césium.

Un vote d'orientation sur le choix d'un des deux projets fournit les résultats suivants :

*Projet B* : 11 voix pour, 9 contre.

*Projet A* : 12 voix pour, 8 contre.

Mr le PRÉSIDENT remarque alors qu'aucun des projets ne paraît pouvoir recueillir, même après certaines modifications, une majorité suffisante. Il est donc demandé au groupe de travail de rédiger un troisième projet constituant un compromis entre les diverses opinions exprimées au cours des discussions.

Un examen de ce troisième projet montre l'utilité de quelques retouches, en particulier pour l'introduction de considérants figurant

déjà dans les projets A et B, et pour l'indication que le choix d'une nouvelle transition conduise à une valeur en concordance avec celle qui est attribuée à la fréquence du césium.

Ce nouveau projet, soumis au vote, est adopté à l'unanimité moins deux voix et une abstention. (*Recommandation S1*).

Les deux délégués ayant voté contre donnent les raisons suivantes :

Mr MARKOWITZ estime que le maser à hydrogène sera probablement beaucoup plus précis que l'étalon à césium dans deux ou trois ans, que le texte adopté risque de retarder les études sur le maser à hydrogène, et qu'il sera en pratique difficile de changer la nouvelle définition.

Mr STOYKO n'est pas opposé au principe d'une définition atomique de l'unité de temps, qu'il utilise déjà en pratique, mais il estime qu'une adoption immédiate est prématurée.

En tant qu'invité, Mr RAMSEY a désiré s'abstenir.

Après ces explications, Mr HENDERSON, au nom des délégués, remercie Mr le Président pour son efficace direction des débats, qui ont enfin abouti à un résultat positif. Mr le PRÉSIDENT remercie le Comité Consultatif pour son travail si utile et pour la qualité des contributions et des discussions.

Avant de se séparer, le Comité Consultatif charge Mr Terrien d'apporter à la recommandation adoptée les légères retouches de détail nécessaires pour améliorer sa rédaction. Le texte définitif est reproduit ci-dessous.

(Bagnaux, 19 mars 1964)

#### RECOMMANDATION S 1

*Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,*

##### CONSIDÉRANT

*le désir unanime d'une définition atomique de l'unité d'intervalle de temps ;*

*les progrès acquis dans l'utilisation des étalons atomiques de fréquence à césium ;*

*les progrès nouveaux et importants qui peuvent être obtenus à bref délai à la suite des études en cours sur les étalons atomiques ou moléculaires de fréquence utilisant par exemple l'hydrogène ou le thallium ;*

##### RECOMMANDE

*1° que la seconde, unité de base du Système International d'Unités pour l'intervalle de temps, soit définie comme la durée d'un nombre spécifié de périodes d'une radiation correspondant à une transition spécifiée entre deux niveaux d'énergie d'un atome ou d'une molécule ;*

*2° que, lorsque le moment sera venu de choisir cette transition, la définition de la seconde soit en concordance avec la valeur 9 192 631 770 hertz attribuée à la fréquence de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux*

hyperfins  $F = 4$ ,  $M_F = 0$  et  $F = 3$ ,  $M_F = 0$  de l'état fondamental  ${}^2S_{1/2}$  de l'atome de césium 133 non perturbé par des champs extérieurs;

3° que la seconde dont la définition a été adoptée en 1956 par le Comité International des Poids et Mesures et ratifiée en 1960 par la Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures soit utilisée, sous l'appellation de seconde des éphémérides, seulement pour les besoins de la mécanique céleste, et que cette définition soit abrogée pour les autres usages;

4° en attendant une formulation complète de la définition de la seconde, qu'il soit admis que l'étalon provisoire de fréquence sera la radiation mentionnée ci-dessus en 2°, c'est-à-dire la radiation correspondant à la transition entre les niveaux hyperfins  $F = 4$ ,  $M_F = 0$  et  $F = 3$ ,  $M_F = 0$  de l'état fondamental  ${}^2S_{1/2}$  de l'atome de césium 133 non perturbé par des champs extérieurs avec la valeur 9 192 631 770 hertz;

5° que les laboratoires nationaux et internationaux experts dans ce domaine poursuivent activement les études entreprises sur les étalons atomiques et moléculaires de fréquence en vue de préciser le choix de la transition qui sera spécifiée dans la définition complète de la seconde;

6° que le Comité International des Poids et Mesures demande à la Douzième Conférence Générale des Poids et Mesures le pouvoir de choisir cette transition avant la Treizième Conférence.



## ANNEXE 1

---

# L'UNITÉ DE TEMPS

par L. ESSEN

National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

(Traduction remise)

---

*Abstract.* — It is already well established experimentally that the frequency of a number of atomic transitions can be given with an accuracy of  $3 \times 10^{-11}$ ; and that this accuracy can be used in practice by means of radio transmissions. This represents such an advance on the accuracy of astronomical time that a new definition of time interval should be made. The frequencies of the different transitions can be compared with high precision and it is not of great importance which is chosen for the purposes of the definition. The chosen transition should have been thoroughly evaluated and should be convenient to use.

## I. INTRODUCTION

L'adoption d'une unité atomique de temps soulève des problèmes complexes et il peut être utile que chacun exprime son opinion avant la réunion du Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde: c'est en effet un moyen de clarifier nos points de vue et de fournir une base pour les discussions. Il est utile de commencer par rappeler les faits suivants établis expérimentalement:

1. Une unité atomique de temps peut être réalisée à l'aide d'un jet atomique de césium avec une précision de  $3 \times 10^{-11}$  et cette unité pourra être transmise en ondes myriamétriques dans le monde entier avec la même précision.

2. La précision de la fréquence étalon et l'utilisation des signaux horaires ont été de ce fait améliorées au moins d'un facteur 100 et les résultats acquis sont utilisables immédiatement.

3. Des mesures physiques et des applications radio ont déjà été effectuées avec cette précision et il est urgent d'adopter officiellement une unité atomique de temps pour éviter toute confusion.

Avant de prendre une décision on doit répondre à deux questions : quelle sera la transition atomique particulière utilisée pour cette définition et quelle valeur devra-t-on attribuer à cette transition ?

## II. CHOIX DE LA TRANSITION

Plusieurs fréquences atomiques ont déjà été déterminées avec une grande précision en fonction de la fréquence hyperfine du césium ; cette fréquence est utilisée comme étalon provisoire depuis 1955. Comme on peut effectuer facilement une comparaison, il n'est pas d'une importance fondamentale de savoir laquelle des transitions sera choisie pour servir d'étalon définitif. Le choix devra être guidé par la précision déjà obtenue et vérifiée, et par la facilité avec laquelle cette précision peut être atteinte. Il n'est pas nécessaire de spécifier la technique utilisée dans la réalisation de l'étalon bien que, inévitablement, elle aura une influence sur le choix.

Les seules transitions utilisées jusqu'ici sont celles du spectre d'inversion de la molécule d'ammoniac et du spectre hyperfin de l'hydrogène et des éléments alcalins dans leur état fondamental. Dans les niveaux d'énergie hyperfins les atomes possèdent des propriétés magnétiques qui permettent de mesurer les fréquences de Bohr en utilisant la technique du jet atomique. Les valeurs obtenues par cette méthode sont presque totalement insensibles aux influences extérieures. Les atomes traversent un champ magnétique uniforme faible et sont soumis à un champ magnétique alternatif dans deux petites régions de leur parcours. La précision de l'étalon augmente linéairement avec le temps de transit des atomes entre ces régions et il est alors avantageux d'utiliser l'atome qui a la plus faible vitesse à la température de fonctionnement. Manifestement l'hydrogène ne convient pas et, à ce point de vue, le césium est légèrement meilleur que le thallium. Des considérations pratiques font que le césium est particulièrement facile à utiliser et les premières mesures effectuées en 1955 ont montré que l'unité de temps pourrait être définie avec une précision de  $1 \times 10^{-10}$ . Des étalons au césium réalisés indépendamment ont maintenant fonctionné depuis un certain nombre d'années avec une exactitude de  $3 \times 10^{-11}$  et les comparaisons faites entre deux étalons dans le même laboratoire concordent à mieux que  $1 \times 10^{-11}$ . L'unité de temps provisoire utilisée actuellement est basée sur la comparaison faite pendant trois années entre l'étalon au césium et l'unité astronomique.

La transition du thallium a été étudiée dans deux laboratoires. Les difficultés expérimentales supplémentaires liées à ce corps ont été surmontées jusqu'à un certain point et on pense que l'étalon au thallium aura la même précision que l'étalon au césium. Les avantages et les inconvénients relatifs dépendent des conditions expérimentales qui limitent la précision que l'on peut obtenir. Le paramètre qui intervient n'est pas encore bien établi, mais l'expérience acquise au N.P.L. indique qu'il est probable que ce soit l'égalité de phase dans les deux régions où ont lieu les transitions. S'il en est ainsi, il y a quelque avantage à utiliser le césium qui a une fréquence plus basse et ainsi des pertes plus faibles dans la cavité.

La transition hyperfine de l'hydrogène a été utilisée avec succès pour produire des oscillations dans un maser et la fréquence mesurée dans deux laboratoires est en bon accord dans le domaine de précision de la mesure qui, dans un cas seulement, était cependant relativement faible ( $\pm 25 \times 10^{-10}$ ). Les valeurs moyennes indiquées concordent à  $3 \times 10^{-10}$  près environ. Il existe un déplacement de fréquence dû aux parois de la chambre contenant l'hydrogène; il est difficile de mesurer ce déplacement mais on l'estime à  $3 \times 10^{-11}$ . Il est alors probable que tous les masers sont soumis à cet inconvénient d'entraînement de fréquence par la cavité résonnante et certaines techniques devront être mises au point pour maintenir l'accord de la cavité avec une très grande précision. Le champ magnétique a aussi une grande influence et on doit utiliser un blindage très efficace. Malgré ces difficultés on estime que l'on peut obtenir une reproductibilité de  $1 \times 10^{-12}$ .

Un avantage du maser à hydrogène est qu'il produit une oscillation radio d'une grande pureté spectrale qui est utile pour certaines applications. Il en est de même du maser à ammoniac qui a été largement utilisé comme oscillateur étalon. On estime que la fréquence peut être ramenée à la valeur exacte de la raie spectrale avec une exactitude proche de  $1 \times 10^{-10}$ .

On dispose donc d'informations suffisantes qui sont utilisables pour la définition d'une unité en fonction de la fréquence non perturbée d'une raie spectrale, avec une précision meilleure que  $1 \times 10^{-10}$  et même très proche de  $1 \times 10^{-11}$ . Non seulement le désir général de définir l'unité par un étalon naturel serait satisfait, mais cette unité serait d'une pratique rigoureuse car elle est immédiatement accessible avec la précision de la définition à l'aide d'autres étalons locaux ou des transmissions de fréquences étalons. Les valeurs d'autres raies utilisables, en accord avec la raie choisie, pourraient être données pour la commodité. Par exemple, si comme maintenant la fréquence de la raie ( $F = 4, M_F = 0$ )  $\leftrightarrow$  ( $F = 3, M_F = 0$ ) du césium 133 était fixée à 9 192 631 770 Hz pour un champ nul, la fréquence des autres raies serait, en utilisant les valeurs obtenues à Neuchâtel :

Hydrogène . . . . .	( $F = 1, M_F = 0$ ) $\leftrightarrow$ ( $F = 0, M_F = 0$ )	1 420 405 751 Hz
Thallium 205 . . . . .	( $F = 1, M_F = 0$ ) $\leftrightarrow$ ( $F = 0, M_F = 0$ )	21 310 833 945 Hz
Ammoniac	$\left\{ \begin{array}{l} {}^{14}\text{NH}_3 \dots (J = 3, K = 3) \\ {}^{15}\text{NH}_3 \dots (J = 3, K = 3) \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 23 870 129 420 \text{ Hz} \\ 22 789 421 730 \text{ Hz.} \end{array} \right.$

Si par la suite il est établi qu'une autre raie peut être définie avec une plus grande précision que celle du césium, il sera facile de l'adopter en lui attribuant une valeur telle que la valeur de l'étalon précédemment adopté reste la même dans les limites des mesures.

### III. CHOIX DE LA VALEUR

La valeur d'une nouvelle unité est habituellement choisie de façon qu'elle soit en accord avec l'ancienne dans la limite de la précision avec laquelle cette dernière pouvait être utilisée. Dans le cas de l'unité de temps, une difficulté provient de ce que l'unité adoptée par la Conférence Générale des Poids et Mesures n'est généralement pas utilisée dans les signaux horaires. On trouve encore plus pratique d'utiliser l'unité de temps universel

(T.U.2) bien que l'on sache qu'elle varie d'une façon importante et qu'elle diffère actuellement (1963) de  $130 \times 10^{-10}$  de la seconde de T.E. adoptée. L'unité atomique provisoire a été obtenue en comparant l'étalon au césium avec le Temps des Éphémérides sur une période de trois années. Les mesures ultérieures ont donné sensiblement les mêmes résultats, mais elles n'ont pas permis d'abaisser la limite de  $\pm 22 \times 10^{-10}$ . Cette unité a été utilisée pour le réglage de certaines fréquences étalons et des signaux horaires, mais pour que deux unités de temps différentes ne puissent être transmises simultanément les signaux ont été délibérément décalés en fréquence d'une quantité telle que l'intervalle entre les impulsions de temps soit égal à la seconde de T.U.2. Cette solution de compromis était relativement bonne, bien qu'elle ait embarrassé les radioélectriciens et les physiciens non compétents dans ces problèmes. Mon point de vue est que l'on devrait donner à l'unité atomique une valeur qui puisse être utilisée pour toutes les mesures de fréquence et de temps. Cette valeur ne dérange pas le physicien, et si elle diffère de la valeur provisoire les quelques résultats expérimentaux précis déjà exprimés en fonction de cette dernière pourront aisément être convertis dans la nouvelle unité. C'est le travail des astronomes qui en sera affecté et cette décision difficile doit donc dépendre d'eux.

Si l'unité atomique est définie de façon qu'elle concorde le mieux possible avec la seconde de Temps des Éphémérides, la méthode la plus logique sera de la considérer comme base dans toutes les utilisations de fréquence ou de temps et de publier chaque année, à l'avance, des tables de corrections pour ceux qui désirent utiliser d'autres systèmes de temps non uniforme. D'autre part, puisque ces utilisateurs seront probablement satisfaits avec une précision nettement plus faible que celle de l'unité atomique, des réglages par pas pourront être faits aux impulsions de 1 seconde de façon à maintenir ce temps aussi près du T.U.2 qu'il est nécessaire à ces utilisateurs. Les pas devront être d'une quantité connue et ils devront être envoyés à des instants préétablis de façon à ne causer aucune confusion pour les utilisateurs exigeant des intervalles de temps précis.

(1<sup>er</sup> avril 1963)

## ANNEXE 2

---

# NOUVELLE DÉFINITION DE L'UNITÉ DE TEMPS

Par W. MARKOWITZ

U.S. Naval Observatory

(Traduction)

---

*Abstract.* — The frequency of the hydrogen maser with respect to the second of Ephemeris Time was determined in May 1963 jointly by the U. S. Naval Observatory, the Naval Research Laboratory, and the Bomac Laboratories of Varian Associates. Experiments are in progress in other laboratories.

Loran-C was used to refer the hydrogen maser at Beverly, Massachusetts, to the frequency system of the Naval Observatory, Washington, based on cesium resonators about the world. Frequency was compared to 1 part in  $10^{12}$  in one day with Loran-C.

There is a present need for a minimum precision of 1 part in  $10^{12}$  for the atomic standard to be adopted to define the unit of time interval. 1964 is too early to make a good choice between cesium, thallium, and hydrogen, but this can probably be done about 1966.

### I. INTRODUCTION

En 1960 la Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures a recommandé que les recherches sur les étalons atomiques de fréquence soient activement poursuivies de sorte qu'une recommandation pour une définition atomique de l'unité d'intervalle de temps puisse être présentée à la Douzième Conférence Générale prévue à l'époque pour 1966.

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (C.C.D.S.) a recommandé que des comparaisons de différents étalons atomiques de fréquence soient faites aussi largement que possible, tant à l'intérieur d'un même laboratoire qu'entre laboratoires au moyen de transmissions par radio. Le Comité Consultatif a de plus recommandé que les rapports sur les expériences et les techniques de comparaison soient diffusés rapidement.

Ce rapport concerne essentiellement le maser à hydrogène. Il y est également question de l'emploi du Loran-C pour les comparaisons de fréquence, de la date et de l'intervalle de temps, de la précision recherchée pour la seconde atomique, et de quelques remarques sur l'adoption de la seconde atomique.

## II. MASER A HYDROGÈNE

Des résultats récents sont présentés et des expériences en cours sont décrites. On souligne que les résultats expérimentaux sont provisoires.

a. Les deux masers d'une paire montrent des stabilités relatives de l'ordre de  $1 \times 10^{-12}$  à  $1 \times 10^{-13}$ . Une paire se trouve à l'Université Harvard. Une autre paire, construite sous le patronage de l'Office of Naval Research et de la N.A.S.A., se trouve aux Bomac Laboratories of Varian Associates, Beverly, Mass. Une troisième paire se trouve au U.S. Army Electronics R. and D. Laboratory, Fort Monmouth, N. J. Le second maser d'une quatrième paire est en cours de construction au Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères, Neuchâtel.

Il est important de noter que les deux masers d'une paire sont réglés indépendamment. La fréquence de l'un n'est pas réglée sur celle de l'autre.

b. En mai 1963 des mesures furent faites en commun par le U.S. Naval Observatory, le Naval Research Laboratory et les Bomac Laboratories pour déterminer  $f_H$ , fréquence de l'hydrogène, en fonction de la seconde de temps des éphémérides.

Les mesures furent rapportées au système du temps atomique T.A.1, qui a pour base les résonateurs à césium situés dans huit laboratoires dans le monde. Les poids employés dans la détermination de T.A.1 sont :

	Poids		Poids
Naval Obs., Washington.....	2	C.N.E.T., Paris .....	1
Naval Obs., Richmond .....	2	N.B.S., Boulder.....	10
N.R.L. Washington .....	2	N.P.L., Teddington ..	10
Cruft (Harvard) .....	2	Neuchâtel .....	10

La liaison entre le maser à hydrogène de Beverly et l'horloge pilote du Naval Observatory à Washington fut établie au moyen d'une surveillance commune des stations Loran-C de la côte atlantique du U.S. Coast Guard, dont le réglage est assuré par le Naval Observatory.

Les valeurs de  $f_H$  furent déterminées pour 10 intervalles d'environ une journée chacun, pour des dates moyennes comprises entre 12,3 et 23,4 mai 1963. L'erreur probable d'une seule détermination est  $\pm 0,005$  Hz par rapport au système de fréquence du Naval Observatory.

On a appliqué une correction pour le champ magnétique mais non pour le déplacement dû aux parois.

Voici trois valeurs moyennes. Le nombre des chiffres significatifs traduit la précision inhérente aux systèmes de référence.

- (I) 1 420 405 751,734  $\pm$  0,002 Hz (Système de fréquence du Naval Obs., mai 1963).
- (II) 1 420 405 751,73  $\pm$  0,02 (Césium = 9 192 631 770 Hz à champ nul).
- (III) 1 420 405 752  $\pm$  3 (Seconde de T.E. déduite d'observations astronomiques).

c. N. Ramsey, D. Kleppner et S. Crampton ont l'intention de publier prochainement la valeur absolue de  $f_H$ , telle qu'elle fut déterminée les 11 et 12 juin 1963 à Harvard. Les corrections pour le champ magnétique

et le déplacement dû aux parois auront été appliquées. On s'est servi du Loran-C comme référence et le Naval Observatory a déterminé que sa fréquence en fonction de T.A.1 était, pour les dates ci-dessus,

$$- 1\,299 \pm 1 \times 10^{-11}.$$

*d.* Dans une lettre du 25 juin 1963, P. Kartaschoff m'informe que la fréquence obtenue récemment à Neuchâtel pour le maser à hydrogène est ... 751,5  $\pm$  0,3 Hz. Des écrans magnétiques améliorés sont en cours de construction.

*e.* D'autres masers à hydrogène sont en construction dans des laboratoires d'Europe et des États-Unis.

*f.* *Déplacement dû au champ magnétique.* La correction pour les masers des laboratoires Bomac est de 0,002 3 Hz. Celle pour les masers de Harvard est identique. L'incertitude sur la correction est inférieure à  $1 \times 10^{-12}$ .

*g.* *Déplacement dû aux parois.* A Harvard on a obtenu une valeur d'environ  $2 \times 10^{-11}$  pour le déplacement dû aux parois d'un récipient de 15 cm. L'exactitude avec laquelle on peut déterminer ce déplacement est en cours d'étude à Harvard et ailleurs. Le fait que l'hydrogène convienne pour définir la seconde atomique dépendra beaucoup de cette précision.

*h.* Il est nécessaire de mener de front des comparaisons de masers de construction différente, situés dans des laboratoires différents. On envisage de commencer à faire des expériences en commun vers octobre 1963, en utilisant les masers de Harvard, des Bomac Laboratories, du Naval Research Laboratory (Washington, D.C.) et (en janvier 1964) de Fort Monmouth. On utilisera le Loran-C et les transmissions en ondes myriamétriques comme références communes. Nous acceptons volontiers toute offre de coopération de la part d'autres laboratoires pour participer à des comparaisons en commun de masers à hydrogène.

*i.* Il est évident que des travaux sur les masers à hydrogène sont activement poursuivis et que des techniques existent qui permettent de faire des comparaisons avec une très grande précision. D'ici 1965, nous devrions avoir une valeur définitive de la fréquence de l'hydrogène et connaître sa reproductibilité. Nous savons déjà que la stabilité est très grande.

### III. LORAN-C

Les fréquences peuvent être comparées avec une précision de  $1 \times 10^{-12}$  sur une journée et  $1 \times 10^{-13}$  sur 10 jours par l'emploi simultané du Loran-C. Des stations Loran-C existent en Europe et il est possible qu'elles puissent être synchronisées avec la chaîne de la côte Est des États-Unis dans un an environ. Si cela est réalisé, les masers à hydrogène des laboratoires d'Europe et des États-Unis pourraient alors être comparés avec une précision dépassant  $1 \times 10^{-12}$ .

#### IV. INTERVALLE DE TEMPS ET DATE

La physique s'intéresse aux intervalles de temps; il n'est jamais question de date.

La Résolution 10 adoptée par la Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures en 1960 se rapporte seulement à l'adoption d'une échelle d'intervalle de temps fondée sur une transition quantique.

L'astronomie s'intéresse essentiellement à la date, c'est-à-dire au Temps Universel et au Temps des Éphémérides. L'astronomie n'a besoin immédiatement d'aucune date en particulier. Toutefois la navigation a un besoin immédiat de la date du Temps Universel.

Il est possible de fournir, à l'aide d'une transmission radio, une fréquence constante par rapport aux étalons atomiques et la date de Temps Universel; cela est en cours.

#### V. SECONDE ATOMIQUE. PRÉCISION EXIGÉE

L'expérience décrite en II. *b* a montré que le Loran-C s'avérait stable en fréquence d'un jour à l'autre avec un écart probable inférieur à  $3 \times 10^{-12}$ . (Cette valeur comprend la variation interne du Loran-C, l'erreur dans sa mesure à Beverly et d'autres erreurs éventuelles dans les mesures.) J. Pierce, à Harvard, fait aussi état (1<sup>er</sup> juin 1963) d'une grande stabilité du Loran-C, fondée sur quatre intervalles de 24 heures.

La station pilote Loran-C de Cape Fear, N.C., est normalement contrôlée par une cellule à rubidium qui fournit une fréquence stable à environ  $1 \times 10^{-12}$  près pour des intervalles de l'ordre de la semaine. Toutefois la fréquence de la cellule à gaz peut varier.

En conséquence, le besoin se fait déjà sentir d'un étalon atomique qui fournira une unité d'intervalle de temps avec une précision de  $1 \times 10^{-12}$ .

La définition de la seconde atomique devrait être fondée sur une transition quantique assurant cette précision, ou si possible une précision supérieure.

Bien que l'hydrogène semble prometteur, nous ne savons toutefois pas encore si sa précision excédera celle du césium, soit environ  $1 \times 10^{-11}$ , ou celle du thallium. Les deux prochaines années donneront l'occasion de faire des expériences permettant de choisir la meilleure transition quantique.

#### CONCLUSION

Bien qu'elle ne soit pas encore adoptée officiellement, la seconde atomique est utilisée en pratique comme unité d'intervalle de temps. Elle est fondée sur la valeur provisoire 9 192 631 770 Hz de la fréquence de transition du césium en champ nul.

Puisque la seconde atomique est déjà utilisée, aucun problème ne surgira lors du passage de la seconde des Éphémérides à la seconde atomique comme unité fondamentale d'intervalle de temps.

La Douzième Conférence Générale des Poids et Mesures devait tout d'abord se réunir en octobre 1966, mais il s'est avéré nécessaire qu'elle se tienne en octobre 1964. Cela est trop tôt pour permettre de prendre une décision en ce qui concerne la seconde atomique, compte tenu des progrès rapides qui sont actuellement faits avec les différents étalons atomiques. En théorie, une définition de la seconde atomique pourrait être donnée par la Conférence Générale de 1964 et modifiée par la suite. En pratique, il serait toutefois extrêmement difficile de changer, une fois qu'une seconde atomique fondée sur une transition quantique particulière aurait été adoptée par une Conférence Générale et serait utilisée dans les publications. Il est probable que vers 1966 les mérites respectifs du césium, de l'hydrogène et du thallium seront évalués, ce qui permettrait alors de définir une seconde atomique.

(12 août 1963)

## ANNEXE 3

---

### Union Radioscopique Internationale (U.R.S.I.)

Texte des résolutions 1 et 2 adoptées par la Commission 1 au cours de l'Assemblée Générale de l'U.R.S.I. tenue à Tokyo en septembre 1963.

---

#### RÉSOLUTION 1

*L'U.R.S.I. considérant* que certaines mesures physiques exigent une précision de la mesure du temps que seul un étalon atomique de fréquence peut fournir;

*recommande* que les résultats de telles mesures soient exprimés en fonction d'une unité atomique de temps;

*exprime le vœu* qu'une unité atomique de temps soit adoptée aussitôt que possible par la Conférence Générale des Poids et Mesures.

L'unité adoptée devrait être basée sur la transition atomique que le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde considérerait comme la plus satisfaisante à l'heure actuelle, étant entendu que, le cas échéant, les progrès techniques devraient entraîner le réexamen de la question en vue de l'adoption d'une transition susceptible d'une plus grande précision. Toute nouvelle transition adoptée ultérieurement devrait conduire à une valeur comprise dans les limites d'incertitude de la transition précédemment adoptée.

*De plus, considérant* la confusion produite par le décalage volontaire de la fréquence des émissions de fréquences étalons,

*l'U.R.S.I. recommande* que, lorsqu'une unité atomique sera adoptée officiellement, les émissions de fréquences étalons soient effectuées sans décalage.

Il est demandé au Secrétaire Général de l'U.R.S.I. de communiquer cette résolution au Bureau International des Poids et Mesures, au Comité Consultatif International des Radiocommunications et à l'Union Astronomique Internationale dans les meilleurs délais.

#### RÉSOLUTION 2

*L'U.R.S.I. considérant*

a. que les étalons atomiques permettent de définir une unité de temps avec une précision de l'ordre de  $10^{-11}$  par rapport à une transition atomique;

b. que l'intégration de fréquences atomiques a été réalisée expérimentalement dans le but d'établir des échelles de temps atomique;

c. que l'obtention d'une origine commune du temps atomique, à partir de laquelle pourrait être fixé l'instant de n'importe quel événement, aurait un intérêt scientifique

important, spécialement pour les expériences et observations portant sur de longues durées;

d. que, pour les mesures physiques, il est nécessaire de mesurer des intervalles de temps de n'importe quelle durée, par rapport à une échelle commune à tous les observateurs;

*recommande*

1° que soient établies des échelles de temps atomique, par rapport aux étalons atomiques de fréquence nationaux;

2° que les origines de ces échelles soient reliées les unes aux autres avec toute la précision permise (actuellement de l'ordre de la microseconde);

3° que les différences de temps résiduelles entre ces échelles soient régulièrement déterminées.

Il est demandé au Secrétaire Général de l'U.R.S.I. de communiquer cette résolution au Bureau International des Poids et Mesures, au Comité Consultatif International des Radiocommunications et à l'Union Astronomique Internationale dans les meilleurs délais.



## ANNEXE 4

---

### NOTE SUR LA STABILITÉ DU MASER A HYDROGÈNE

Par R. F. C. VESSOT

Varian-Bomac Laboratories, Beverly, Mass.

---

*Abstract.* — During 1963 experiments were done on the relative frequency stability of two hydrogen masers. The first experiment was a two-week comparison via Loran C with the A.1 frequency system. Data was taken relating the time as measured by the masers to the time obtained by monitoring Loran C and sent daily to the U.S. Naval Observatory. This has been reported in a document sent to the Consultative Committee for the Definition of the Second (Annexe 2 p. 27). The second experiment is a 69-day run of beat frequency data taken from two independently tuned masers. Data was continuously recorded, and hourly readings of the relative fractional frequency drift are shown in the figure 2. The maximum frequency difference is of  $2.5 \times 10^{-12}$ . The r.m.s. deviation is about a factor of 10 smaller than this. Further work on temperature stabilization and wall coatings is in progress.

Durant l'année 1963 des expériences sur la stabilité de deux masers à hydrogène ont été poursuivies aux Varian-Bomac Laboratories. Cette note décrit brièvement les résultats. Deux expériences ont été faites pour déterminer la stabilité de ces appareils dont un schéma est donné à la figure 1.

1° Une expérience d'une durée de deux semaines pour comparer les masers au système de temps atomique T.A.1 en utilisant des fréquences très basses (100 kHz). Les pulsations avec cette fréquence sont produites par la chaîne de stations Loran-C et sont utilisées comme signaux de comparaison. Nos résultats ont été quotidiennement envoyés au Naval Observatory (États-Unis). Les conclusions de cette expérience ont été exposées par Markowitz, Hall, Hastings, Stone, Vessot et Peters dans *Frequency*, 1, n° 3 (mars-avril 1963) et aussi dans un document présenté au Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (Annexe 2, p. 27).

2° Une expérience d'une durée de 69 jours a été faite. La différence de fréquence entre deux masers a été obtenue par battement. Un enregis-

trement qui ne fut interrompu qu'une seule fois pendant cette durée a été fait. La différence est donnée sous forme d'une fraction de la fréquence

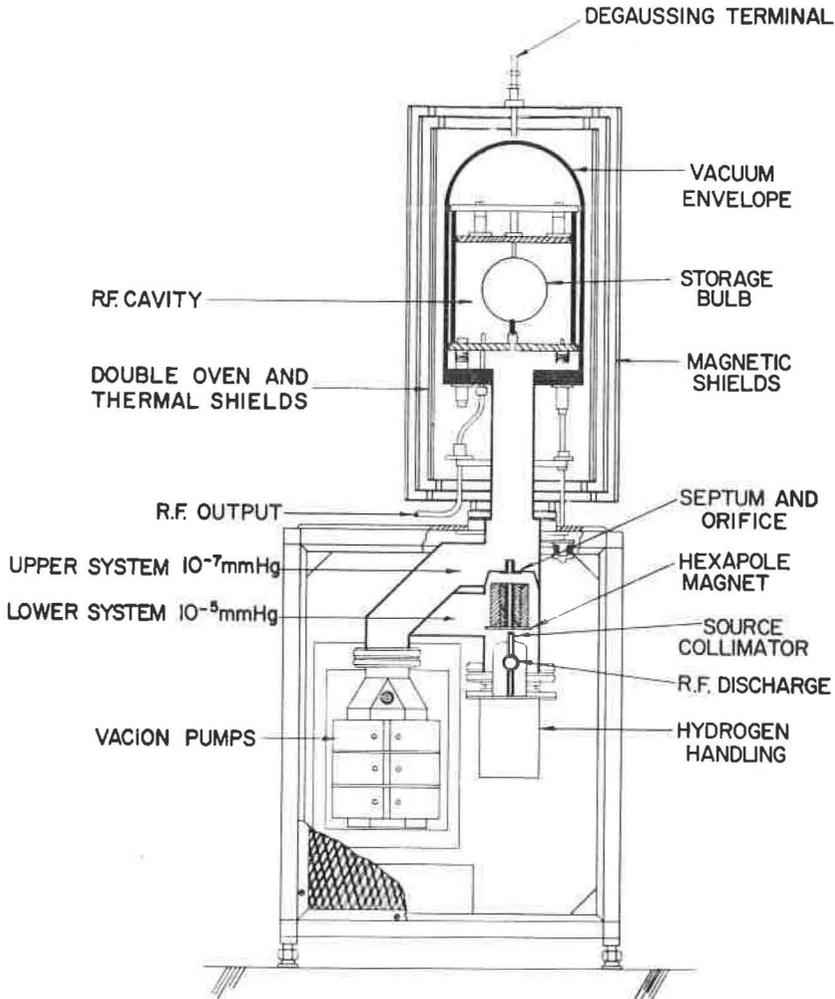


Fig. 1. — Étalon de fréquence à hydrogène atomique.

émise par le maser et a été mesurée d'heure en heure. Les résultats sont donnés à la figure 2.

Il est important de noter ici que ces masers ont été accordés indépendamment et qu'ils n'ont pas été ajustés pendant cette durée.

La différence maximale de fréquence est de  $2,5 \times 10^{-12}$  et a eu lieu le 12 mai. L'autre différence de même grandeur a eu lieu les 27 et 28 avril et fut causée par l'installation de trois isolateurs fortement magnétisés et sans écrans à une distance de 0,5 m de l'un des masers. La variation quotidienne est causée par le changement de température du laboratoire qui, pendant ces mois, a varié de 27 à 16 °C. Cette dernière température fut observée le 12 mai.

On ne note pas de différence systématique plus grande que  $1 \times 10^{-12}$  pendant ces 69 jours. L'écart-type calculé à partir de mesures faites toutes les heures pendant les 46 jours du 9 avril au 24 mai est  $4,8 \times 10^{-13}$ . Le calcul de l'écart-type pour l'intervalle entier de 69 jours n'a pas été fait. Toutefois, un examen du graphique nous permet de constater que les résultats sont semblables.

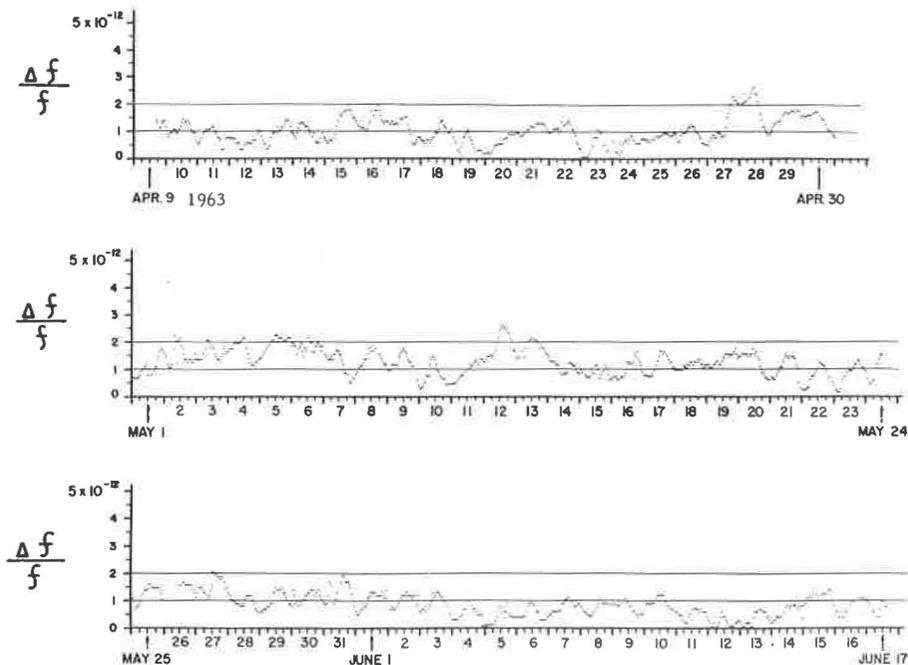


Fig. 2. — Différence de fréquence entre deux masers à hydrogène.

Le maser est un appareil actif, étant un oscillateur qui émet de l'énergie. Il donne, pour des intervalles courts (1 à 10 secondes), une stabilité dix fois supérieure à celle mesurée pour une série d'intervalles d'une heure.

Le but des futures expériences consistera à améliorer la caractéristique de température et à étudier les problèmes de revêtement du ballon d'accumulation.

(28 octobre 1963)

## ANNEXE 5

---

### LA DÉFINITION D'UNE UNITÉ DE TEMPS

Bureau des Longitudes (France)

---

*Résumé.* — On expose les exigences fondamentales auxquelles doit satisfaire la définition de l'unité de temps, puis les deux seules solutions cohérentes que l'on peut envisager. Le Bureau des Longitudes est en principe favorable à une éventuelle définition physique de la seconde moyennant certaines conditions préalables, mais il considère que le temps des éphémérides est indispensable et doit être conservé concurremment avec l'échelle de temps atomique; il considère que ces deux échelles sont distinctes et doivent être comparées sans discontinuité dans l'avenir.

#### PRÉAMBULE

Le problème de la définition d'une unité de temps ne peut être considéré séparément de celui de l'emploi d'une échelle de temps. La notion d'intervalle de temps — et par suite celle d'une unité d'intervalle de temps — est, en elle-même, une notion incomplète. La comparaison de deux mesures d'intervalle de temps, effectuées à des époques différentes, n'est possible que si ces mesures sont rapportées à un phénomène évolutif observable et que s'il existe une théorie de l'évolution de ce phénomène dans le temps. L'ensemble de ce phénomène et de la théorie, conventionnelle, qui le décrit, constitue une échelle de temps. Il en résulte que le phénomène fondamental qui définit l'unité d'intervalle de temps doit être le même que celui qui définit l'échelle de temps; l'ensemble de ces deux définitions constitue la définition de l'unité de temps.

Dans les conditions actuelles, deux solutions, et deux seulement, répondent rigoureusement à ces exigences fondamentales :

1<sup>re</sup> solution : *Conserver l'échelle de temps des éphémérides.* On doit alors conserver la définition actuelle de la seconde des éphémérides. L'emploi des horloges pilotées par des étalons atomiques de fréquence doit être strictement limité à celui d'un instrument étalonné (étalon) de mesure des fréquences et des courts intervalles de temps. Le rôle du C.C.D.S. est d'établir cet étalonnage (choix de la transition, des conditions d'emploi, de la valeur numérique de la fréquence) et, éventuellement, de l'améliorer au fur et à

mesure des progrès dans l'observation de la seconde de temps des éphémérides. Dans cette hypothèse, il ne peut être question de définir une seconde physique.

2<sup>e</sup> solution : *Définir une nouvelle unité de temps à l'aide d'un certain nombre de périodes d'oscillation d'un étalon atomique de fréquence.* Il faut dans ces conditions définir également une *échelle de temps atomique*. Celle-ci doit être unique, donc internationale. Une solution serait de postuler que la moyenne pondérée des indications d'un certain nombre d'horloges pilotées par des étalons atomiques de fréquence (utilisant la transition choisie dans la définition de la seconde) ou comparées à celles-ci, est une fonction linéaire à coefficients constants du temps atomique (T.A.). Il faut toutefois remarquer que cette échelle de temps est humaine et ne permet qu'une chronologie strictement limitée en durée. Elle ne couvre donc pas tous les besoins et son adoption ne peut ni ne doit entraîner la disparition de l'échelle de temps en vigueur.

Toute autre solution, comportant par exemple la définition d'une unité physique d'intervalle de temps accolée à l'échelle de temps des éphémérides, serait incohérente et doit être écartée.

#### PRINCIPE D'UNE DÉFINITION PHYSIQUE DE LA SECONDE

Le Bureau des Longitudes, considérant :

1<sup>o</sup>. que les techniques de mesure d'intervalles de temps courts à l'aide d'horloges contrôlées par des étalons atomiques de fréquence permettent une précision nettement supérieure à celle des mesures astronomiques de temps (temps des éphémérides),

2<sup>o</sup>. que l'accessibilité au temps défini à partir de telles horloges constitue un avantage important,

3<sup>o</sup>. que la reproductibilité de telles horloges semble devoir être assurée de façon adéquate dans un proche avenir,

estime que le principe d'une nouvelle définition de la seconde, accompagnée de l'échelle de temps correspondante, en termes d'un nombre donné de périodes d'oscillation d'un étalon atomique de fréquence, est légitime et peut être retenu pour l'avenir, compte tenu des réserves exprimées dans les paragraphes suivants et qui manifestent l'inquiétude du Bureau des Longitudes concernant la manière dont le passage à un nouveau temps pourrait être effectué et l'utilisation que l'on fera de ce temps.

#### CONDITIONS PRÉALABLES

La définition d'une unité de temps doit être entourée des mêmes garanties que celles qu'on a exigées lors de la définition de l'unité de longueur.

Le Bureau des Longitudes considère qu'il n'entre pas dans ses compétences d'émettre un avis sur le corps qui sera choisi pour définir la fréquence de base, ni sur les conditions de son emploi.

Toutefois, il est nécessaire que les conditions expérimentales, dans lesquelles la transition choisie est obtenue, puissent être reproduites sans ambiguïté.

D'autre part, il estime que des études approfondies doivent être entreprises sur les influences des divers paramètres physiques sur la fréquence produite par l'étalon dans les conditions de son utilisation effective. Ces études devraient comprendre, entre autres, des comparaisons *directes* d'étalons atomiques de fréquence. Leur but serait d'établir des corrections convenables permettant de reconstituer la fréquence de la transition dans les conditions prévues par la définition. Ces travaux pourraient être effectués sous la responsabilité du Bureau International des Poids et Mesures. Le Bureau des Longitudes estime que l'on devrait surseoir à la nouvelle définition de la seconde jusqu'à ce que les travaux ci-dessus aient été menés à bien et que l'accord interne des mesures ainsi obtenues soit de l'ordre de  $10^{-11}$ .

#### LE TEMPS DES ÉPHÉMÉRIDES

Le Bureau des Longitudes considère que le temps ainsi défini est distinct du temps gravitationnel dont le temps des éphémérides constitue une approximation. Ceci découle de considérations théoriques autant que des difficultés pratiques de rattachement de la nouvelle seconde à l'échelle du temps des éphémérides. Il estime que le temps des éphémérides reste indispensable et que son abandon doit être exclu. C'est en effet le seul temps qui permette d'établir une chronologie étendue, sûre et suffisamment précise dans le passé comme dans l'avenir.

Le Bureau des Longitudes émet le vœu que le temps des éphémérides continue à être observé et comparé à la nouvelle échelle de temps, et que les résultats des observations des différences entre le temps atomique, le temps des éphémérides et le temps universel soient publiés sans discontinuité dans l'avenir.

#### CONCLUSION

Le Bureau des Longitudes, dans sa majorité, s'est déclaré en principe favorable à une éventuelle définition physique de la seconde, mais a estimé qu'un certain nombre de conditions doivent être préalablement réunies. D'autre part, il a considéré que le temps des éphémérides doit être conservé concurremment avec la nouvelle échelle de temps atomique pour les besoins respectifs de l'astronomie et de la mesure des fréquences et a émis le vœu que ces deux échelles soient comparées sans discontinuité dans l'avenir.

(30 octobre 1963)

---

## ANNEXE 6

---

# SUR LA CONSERVATION DE L'ÉCHELLE DU TEMPS ATOMIQUE INTÉGRÉ ET LA PRÉCISION DES ÉTALONS ATOMIQUES

Par M<sup>me</sup> A. STOYKO et N. STOYKO

Bureau International de l'Heure

---

*Résumé.* — Depuis 1958 l'intégration est plus sûre, parce que les étalons utilisés sont plus nombreux (8 ou 9). L'étude des trois échelles indépendantes du temps atomique pour la période de cinq années (1958-1963) a montré des différences systématiques moyennes égales à  $1,3 \times 10^{-11}$ . On constate une augmentation progressive de la précision de l'échelle du temps atomique intégré en valeur relative. En cinq années la précision a augmenté de  $9 \times 10^{-11}$  à  $1 \times 10^{-11}$ . En ce qui concerne la valeur absolue, on remarque seulement en 1963 une concordance des échelles de temps d'après les résonateurs à césium du N.B.S., du N.P.L. et du L.S.R.H.

D'après la Recommandation 2 du Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (2<sup>e</sup> Session, avril 1961), nous avons déterminé les échelles de temps d'après les étalons atomiques de neuf laboratoires différents :

1. Centre National d'Études des Télécommunications (C.N.E.T.), Bagnaux, à partir du 1<sup>er</sup> janvier 1958;

2. National Bureau of Standards (N.B.S.), Boulder, à partir du 1<sup>er</sup> janvier 1958;

3. National Physical Laboratory (N.P.L.), Teddington, à partir du 1<sup>er</sup> juillet 1955;

4. Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères (L.S.R.H.) et Observatoire Astronomique (O.A.), Neuchâtel, à partir du 1<sup>er</sup> janvier 1957;

5. Naval Research Laboratory (N.R.L.), Washington, à partir du 13 septembre 1956;

6. Laboratoire Cruft (C.L.), Cambridge, États-Unis, à partir du 1<sup>er</sup> janvier 1961;

7. Conseil National de Recherches (N.R.C.), Ottawa, à partir du 1<sup>er</sup> janvier 1961;

8. U.S. Naval Observatory (N.O.), Station Richmond, à partir du 1<sup>er</sup> janvier 1961;

9. U.S. Naval Observatory (N.O.), Washington, à partir du 1<sup>er</sup> janvier 1961.

Nous avons établi notre système [1] de telle façon qu'au 1<sup>er</sup> janvier 1958 à 20 h T.U. le Temps Atomique Intégré fût égal à l'Heure Définitive (T.U. 2) du Bureau International de l'Heure (B.I.H.).

Les corrections des étalons atomiques intégrés, ainsi que leur moyenne sont publiées dans le Bulletin Horaire [1] du Bureau International de l'Heure.

En plus de l'échelle atomique du Bureau International de l'Heure, il existe des échelles atomiques indépendantes du Naval Observatory de Washington et de l'Observatoire Royal de Greenwich. De plus, d'après les résultats publiés dans le Bulletin Horaire nous avons neuf autres échelles de temps.

Le U.S. Naval Observatory de Washington a établi une échelle de temps atomique intégré de telle façon qu'elle soit égale au T.U.2 obtenu d'après les observations astronomiques de Washington et Richmond, compte tenu de leurs longitudes conventionnelles, le 1<sup>er</sup> janvier 1958 à 0 h T.U.

L'Observatoire Royal de Greenwich à Hertsmonceux a établi son échelle de temps atomique de telle façon qu'elle soit en accord avec le T.U.2 de Greenwich en juin 1955. Il existe encore d'autres échelles indépendantes de temps, dont nous ne possédons pas de séries complètes.

Il existe des différences systématiques entre les diverses échelles indépendantes de temps atomique intégré qu'il est nécessaire de supprimer par un accord international.

Nous donnons dans le tableau I les différences systématiques entre les trois échelles indépendantes de temps atomique intégré pour un intervalle de 5 années (le signe + pour la différence et le signe — pour  $\Delta f/f$  indiquent un retard relatif).

TABLEAU I

	1 <sup>er</sup> janv. 1958	31 déc. 1962	Différence	$\Delta f/f$
Washington-B.I.H. . . . .	+ 0,038 8 s	+ 0,037 8 s	+ 0,001 0 s	$-0,63 \times 10^{-11}$
Greenwich-B.I.H. . . . .	+ 0,961 5	+ 0,958 3	+ 0,003 2	$-2,03 \times 10^{-11}$
Greenwich - Washington	+ 0,923 1	+ 0,921 9	+ 0,002 2	$-1,40 \times 10^{-11}$

On remarque que les différences des échelles de trois intégrations indépendantes de temps atomique sont de l'ordre de 1 à  $2 \times 10^{-11}$  pour un intervalle de cinq années. Les variations des échelles de courte période peuvent être considérablement plus grandes.

Dans le tableau II nous donnons à partir de janvier 1960 les écarts de temps atomique intégré d'après les divers étalons par rapport à leur moyenne pondérée (Boulder, Teddington et Neuchâtel: poids 3; Bagneux, N.R.L. Washington, N.O. Richmond et N.O. Washington: poids 1). Le signe + indique que l'étalon correspondant retarde par rapport à la moyenne.

TABLEAU II

Écartis du temps atomique intégré des différents étalons par rapport à leur moyenne (unité: 10<sup>-4</sup> s).

	C.N.E.T. Bagneux		N.B.S. Boulder		N.P.L. Teddington		L.S.R.H. et O.A. Neuchâtel		N.R.L. Washington		C.L. Cambridge		N.R.C. Ottawa		N.O. Richmond		N.O. Washington		
	O-C		O-C		O-C		O-C		O-C		O-C		O-C		O-C		O-C		
1960 {	+ 052	+ 2	- 29	- 18	+ 28	+ 2	- 016	+ 2	+ 01	- 4									
{	+ 079	+ 4	+ 02	+ 18	- 27	- 1	- 018	+ 14	+ 17	+ 7									
1961 {	+ 101	+ 2	- 15	+ 6	+ 27	- 2	- 053	- 8	- 01	- 15	+ 007	0	+ 14	+ 4	+ 10	+ 3	+ 13	- 14	
{	+ 120	- 3	- 26	0	+ 28	- 2	- 062	- 3	+ 23	+ 5	- 031	+ 5	+ 27	- 3	+ 02	- 3	+ 41	- 1	
1962 {	+ 139	- 8	- 32	- 1	+ 32	0	- 086	- 13	+ 37	+ 14	- 072	+ 7	+ 43	- 6	+ 04	0	+ 78	+ 21	
{	+ 164	- 7	- 37	- 1	+ 36	+ 3	- 089	- 3	+ 28	+ 1	- 133	- 12	+ 73	+ 5	+ 01	- 1	+ 78	+ 6	
1963 {	+ 196	0	- 42	- 1	+ 39	+ 4	- 098	+ 2	+ 26	- 5	- 182	- 18			+ 01	0	+ 82	- 5	
{	+ 229	+ 9	- 47	- 1	+ 32	- 4	- 104	+ 10	+ 32	- 3	- 189	+ 18			00	+ 1	+ 94	- 8	



On remarque une variation progressive qui montre que les fréquences adoptées pour les divers étalons ne correspondent pas toujours à la fréquence 9 192 631 770 de la transition ( $F = 3, M_F = 0$ )  $\leftrightarrow$  ( $F = 4, M_F = 0$ ) du résonateur à césium au champ magnétique zéro.

En utilisant les résultats du tableau II nous avons calculé les écarts semestriels de fréquence des étalons individuels par rapport à leur moyenne que nous publions dans le tableau III. En utilisant le tableau II nous avons calculé, par la méthode des moindres carrés, les valeurs  $\Delta f/f$  de chaque étalon par rapport à la moyenne  $(\Delta f/f)_m$  qui se trouve au bas du tableau III avec leur erreur moyenne quadratique.

En tenant compte de ces valeurs nous avons calculé (tableau II) les écarts « valeurs observées — valeurs calculées » (O — C) du temps atomique intégré de chaque étalon. On voit que ces écarts ne dépassent pas 0,002 s.

En comparant ces résultats avec les résultats de la période 1958 et 1959 [2] on trouve l'amélioration progressive des résultats. La variation moyenne semestrielle de fréquence des étalons individuels qui a été en 1958 égale à  $2,5 \times 10^{-10}$  est descendue progressivement en 1959 jusqu'à 1,7, en 1960 à 1,1, en 1961 à 0,6 et en 1962 à  $0,3 \times 10^{-10}$ . Cette amélioration dépend en partie de l'augmentation progressive de la précision de la comparaison des fréquences.

La précision relative du temps atomique intégré obtenu d'après les résultats semestriels (étalon moyen) est égale respectivement aux valeurs suivantes :

1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	
<u>29</u>	<u>9</u>	<u>4</u>	<u>4</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	$\times 10^{-11}$

On constate une augmentation progressive de la précision de l'échelle de temps atomique intégré en valeur relative. En ce qui concerne la valeur absolue, on remarque seulement en 1963 une concordance des échelles de temps pour les résonateurs à césium de Boulder, Teddington et Neuchâtel.

Actuellement, l'effort principal doit être fait dans le domaine de la reproductibilité absolue des fréquences des étalons atomiques pour qu'on puisse garantir l'uniformité de l'échelle de temps atomique intégré.

(12 novembre 1963)

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] ΣΤΟΥΚΟ (M<sup>me</sup> A.), Temps atomique intégré, *Bulletin Horaire*, Série **6**, 1960, pp. 241-245, pp. 275-276, pp. 301-302.  
 ΣΤΟΥΚΟ (M<sup>me</sup> A.) et ΣΤΟΥΚΟ (N.), Temps atomique intégré d'après les neuf étalons atomiques, *Bulletin Horaire*, Série **5**, 1961, pp. 287-294.  
 [2] ΣΤΟΥΚΟ (M<sup>me</sup> A.) et ΣΤΟΥΚΟ (N.), Temps atomique intégré, *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde*, 2<sup>e</sup> session, 1961, pp. 99-101.

## ANNEXE 7

---

# RÉALISATION DES UNITÉS DE TEMPS ET DE FRÉQUENCE A LA P.T.B.

Par H. BAYER, G. BECKER, G. OHL, W. SCHAFFELD et R. SÜSS

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Allemagne)

(Traduction remise)

---

*Zusammenfassung.* — Zur Darstellung der Einheiten von Zeit und Frequenz stehen der P.T.B. eine Cs-Atomstrahlapparatur (Atomichron, Nat. Comp.), ein Rb-Gaszellen-Frequenzetalon (Varian) und sechs Quarzuhren zur Verfügung. Im Bau sind zwei Cs-Atomstrahlresonatoren, zwei Ammoniakmaser für  $^{16}\text{NH}_3$  mit Doppelstrahl und zwei Wasserstoffmaser; über den derzeitigen Stand der Cs-Resonatoren und der Ammoniakmaser wird näher berichtet. Die Etalons der Bundesanstalt werden regelmässig miteinander und mit Hilfe der Emissionen von GBR (16 kHz), DCF 77 (77,5 kHz), MSF (10 MHz) und WWV (15 MHz) und der vom N.P.L., N.B.S. und L.S.R.H. veröffentlichten Korrekturen mit den Etalons des N.P.L., N.B.S. und L.S.R.H. verglichen. Danach weicht die Frequenz des Atomichrons der P.T.B. seit Januar 1962 bis Juli 1963 im Mittel relativ um weniger als  $1 \times 10^{-10}$  von den drei zuletzt genannten Etalons ab. — Über den Sender DCF 77 sendet die Bundesanstalt Normalfrequenzen und Zeitmessmarken aus. Seit September 1963 wird die Normalfrequenzemission innerhalb von  $\pm 1 \times 10^{-9}$  ihres Sollwertes gehalten. — Mit Hilfe des Atomichrons S 211 wird eine « Atomzeitskala der P.T.B. » gewonnen, wobei angenommen wird, dass das Atomichron nach Reduktion auf das magnetische Gleichfeld Null eine Frequenz von 9 192 631 770 Hz hat. Der Anfangspunkt dieser Skala wurde so gewählt, dass zum Zeitpunkt 1962, Januar 0, 0 h Weltzeit ungefähre Übereinstimmung mit der « Atomzeitskala A 1 » des U.S. Naval Observatory besteht.

### I. INSTALLATION DISPONIBLE

Pour l'élaboration des fréquences étalons et des intervalles de temps la P.T.B. dispose de l'installation suivante :

- a. 1 résonateur à césium commercial (Atomichron, National Company);
- b. 1 étalon de fréquence commercial à cellule à gaz (vapeur de rubidium, Varian);
- c. 6 horloges à quartz;
- d. en construction : 2 résonateurs à césium, 2 masers à ammoniac, 2 masers à hydrogène;

e. au moyen de l'émetteur DCF 77 (77,5 kHz, 12 kW) on diffuse des fréquences étalons et des « Zeitmessmarken » (intervalles de temps sous forme de la durée entre deux signaux).

## II. COMPARAISONS DE FRÉQUENCE

1. *Comparaisons internes de fréquence.* — On compare régulièrement les fréquences des étalons indiqués en I. a, b, c, pris deux à deux, avec une incertitude relative inférieure à  $1 \times 10^{-11}$ .

Les horloges à quartz sont comparées par les moyennes journalières; la comparaison entre l'Atomichron et l'horloge à quartz P2 est faite tous les 10 jours. La valeur suivante de la différence relative de fréquence peut être prévue avec une incertitude d'environ  $3 \times 10^{-11}$ .

L'étalon de fréquence à cellule à gaz (Varian) fonctionne de façon continue depuis janvier 1963. La différence relative de fréquence entre cet étalon et l'horloge à quartz P2 est enregistrée en permanence. Tous les 10 jours, on compare l'étalon à cellule à gaz avec l'Atomichron. Pour l'étalon à cellule à gaz on trouve sur une période de 6,5 mois une variation relative de fréquence de  $-5,5 \times 10^{-11}$  par an en moyenne. L'écart relatif moyen entre les valeurs mesurées sur dix jours et les valeurs attendues était  $1,4 \times 10^{-11}$ .

Les fabricants de l'étalon à cellule à gaz expliquent le changement de fréquence par l'hypothèse d'un dégazage insuffisant de la cellule à gaz au cours de la fabrication. En septembre 1963 on a installé dans l'appareillage une nouvelle cellule à gaz et une lampe à vapeur de rubidium complètement transistorisée.

Un démultiplicateur de fréquence pour la sommation des périodes de l'étalon de fréquence à cellule à gaz est presque achevé.

2. *Comparaisons internationales de fréquence.* — A présent l'Atomichron S 211 sert de base pour l'unité de fréquence. On admet que la fréquence de l'Atomichron (réduite au champ continu magnétique zéro) a la valeur 9 192 631 770 Hz. Cette unité de fréquence de la P.T.B. a été comparée avec celles du N.P.L., du N.B.S. et du L.S.R.H.

*Résultats des mesures :* En utilisant les corrections publiées par le N.P.L., le N.B.S. et le L.S.R.H., les écarts relatifs, exprimés en  $10^{-11}$ , entre l'unité de fréquence de chacun de ces laboratoires et celle définie par l'Atomichron S 211 de la P.T.B. sont les suivants :

Comparaison	Transmission	1962		1963
		janv.-déc.	sept.-déc.	janv.-juil.
NBS-PTB .....	GBR/16 kHz (a)		— 5	— 9
	WWV/15 MHz (b)	— 6		— 8
NPL-PTB .....	GBR/16 kHz (a)		— 12	— 8
	MSF/10 MHz (b)	— 14		— 5
LSRH-PTB .....	DCF 77/77,5 kHz (c)	0		— 10
	MSF/10 MHz (b)	— 11		— 11

(a) à l'aide des mesures de phase de la fréquence porteuse à 15 h T.U.;

(b) à l'aide des mesures de phase à divers instants des signaux 1 000 Hz;

(c) à l'aide des mesures de phase des signaux 1 s à 7 h 30 m T.U.

Les résultats individuels des comparaisons de fréquence à 16 kHz (pris sur 24 heures) divergent d'environ  $\pm 1 \times 10^{-10}$  en moyenne, principalement à cause des fluctuations de la propagation sur les voies de transmission. Il en résulte que la phase de la fréquence porteuse (de jour en jour, rapportée à 15 h, heure de l'Europe centrale) a une incertitude inférieure à 9  $\mu$ s.

Le remplacement du tube du jet après un fonctionnement d'environ une année a causé une élévation relative de fréquence inférieure à  $5 \times 10^{-11}$ . Pendant un fonctionnement de deux ans on n'a constaté aucune variation de fréquence de l'Atomichron dans les limites d'erreur des comparaisons.

### III. ÉMISSION DES FRÉQUENCES ÉTALONS (Voir I.e)

Depuis septembre 1963 les écarts relatifs entre la fréquence de l'émission et sa valeur nominale sont maintenus inférieurs à  $\pm 1 \times 10^{-9}$ . Les changements de fréquence dus à la dérive de l'oscillateur à quartz ( $4 \times 10^{-10}$  par mois) sont, en cas de nécessité, corrigés les mardis à 15 h, heure de l'Europe centrale. Les fluctuations relatives de fréquence d'un jour à l'autre sont de l'ordre de  $10^{-10}$ .

### IV. ÉCHELLE DE TEMPS ATOMIQUE

1. *Dérivation.* — L'intégration de la différence relative de fréquence entre l'Atomichron et l'horloge à quartz de comparaison donne l'état de l'horloge à quartz par rapport à l'Atomichron de la P.T.B. De cette manière on obtient, à partir de l'Atomichron, l'« échelle de temps atomique de la P.T.B. » qui a comme unité d'intervalle de temps la valeur :

$$\frac{9\,192\,631\,770 \text{ Hz}}{f_{S211}} \text{ seconde,}$$

$f_{S211}$  étant la fréquence de l'Atomichron S 211 réduite au champ magnétique continu zéro.

L'origine de cette échelle (la constante d'intégration) fut choisie de manière à avoir pour l'époque 1962, Janv. 0, 0 h T.U. un accord approximatif avec l'« échelle de temps atomique A 1 » du U.S. Naval Observatory.

2. *Émission sur DCF 77.* — Actuellement, les signaux « 1 s » de l'émetteur DCF 77 ont une instabilité de l'ordre de quelques  $10^{-5}$  s. Leur état par rapport à l'« échelle de temps atomique de la P.T.B. » se trouve toujours à l'intérieur de quelques  $10^{-4}$  s en raison des mesures qui sont décrites au paragraphe III. Cet état constant est changé de temps en temps de 50 ms <sup>(1)</sup> pour maintenir en moyenne sa concordance avec le T.U.2 sur une longue durée. En effet, de telles corrections de l'état sont nécessaires tous les 1,5 mois environ <sup>(1)</sup> et elles sont effectuées les mercredis à 15 h, heure de l'Europe centrale.

---

(1) A partir du 1<sup>er</sup> novembre : 100 ms tous les trois mois.

## V. ÉTALONS DE FRÉQUENCE ATOMIQUES ET MOLÉCULAIRES EN CONSTRUCTION

1. *Résonateur à césium.* — On a déjà décrit les détails de construction du résonateur à césium de la P.T.B. [1]. Le résonateur est achevé, à l'exception du multiplicateur de fréquence pour la production de la micro-onde pour la transition du césium. L'emploi primitivement envisagé d'un transformateur de fréquence commercial avec klystron synchronisé a dû être abandonné à cause de la stabilité de phase insuffisante de la micro-onde produite. On projette d'employer un multiplicateur de fréquence direct pour multiplier par le facteur 17 la fréquence d'un oscillateur à quartz à 5,006 880 201 5 MHz, suivi d'un multiplicateur à diodes « varactor » avec le facteur  $4 \times 3 \times 3 \times 3$ . Cet équipement est presque achevé.

Le champ résiduel le long du jet fut réduit à 0,012 Oe (1 A/m) par un blindage cylindrique constitué de plusieurs couches de tôle pour dynamos. Des améliorations additionnelles de l'écran magnétique permettent d'espérer un champ résiduel de quelques mOe (quelques  $10^{-1}$  A/m) au maximum. La transition  $(4, -3) \rightarrow (4, -4)$  dans le champ de deux bobines spatialement séparées mais excitées en phase ( $f = 11,75$  kHz) utilisant un champ continu de 0,033 5 Oe (2,67 A/m) fut expérimentée; cet essai montra l'accord des valeurs mesurée et calculée de la largeur à mi-hauteur de la raie de résonance.

2. *Maser à ammoniac.* — Les recherches sur un maser à ammoniac, muni d'un résonateur rectangulaire [2, 3], mis en service en 1960, sont terminées. D'autres investigations et expériences ont été faites sur un maser avec résonateur rond. Pour ce maser on a mis au point des électrodes à bague et à vis [4] qui sont plus avantageuses que les électrodes à quatre ou six pôles généralement employées.

On a réussi à construire des systèmes de focalisation de dimensions relativement petites avec un très haut rendement de séparation en employant une source de jet à peu près ponctuelle et un diaphragme de séparation spécial. Les jets d'ammoniac produits ont une ouverture angulaire relativement petite, ce qui est avantageux pour les masers employés comme étalons de fréquence. De plus, on a étudié les propriétés des électrodes à bague, dont la forme intérieure est conique.

Deux masers de précision à  $^{15}\text{NH}_3$ , à double jet et résonateur à quartz, sont en construction.

Pour les comparaisons entre des masers à ammoniac et d'autres étalons de fréquence, ainsi que pour des recherches sur les transitions hyperfines de Cs et de Rb, on a construit des transformateurs de fréquence utilisant des diodes « varactor » [5].

3. *Maser à hydrogène.* — On a commencé à construire deux masers à hydrogène. Les installations à vide sont presque achevées.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] SCHAFFELD (W.) et BAYER (H.), *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde*, 2<sup>e</sup> session, 1961, p. 97.
  - [2] BECKER (G.), *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde*, 2<sup>e</sup> session, 1961, p. 92.
  - [3] BECKER (G.), *Z. angew. Phys.*, **16**, 1963, p. 13.
  - [4] BECKER (G.), *Z. angew. Phys.*, **15**, 1963, p. 281.
  - [5] BECKER (G.) et FALTIN (P.), *Z. Instrumentenkunde*, **71**, 1963, p. 159.
-

## ANNEXE 8

---

# LE MASER A HYDROGÈNE ATOMIQUE COMME ÉTALON DE FRÉQUENCE ET DE TEMPS

Par N. F. RAMSEY et D. KLEPPNER

Harvard University, Cambridge, Mass.

(Traduction remise)

---

*Summary.* — The atomic hydrogen maser provides a radiofrequency radiation that is more stable than that from any other known device. At present two masers that are independently set and tuned agree to  $10^{-12}$  and are stable in time to  $5 \times 10^{-13}$ . It is reasonable to expect that in the near future both a stability and an absolute accuracy of  $10^{-13}$  can be achieved. The hydrogen maser is described and the experimental result is given for a measurement of the atomic hydrogen hyperfine frequency in terms of the A.1 time standard of

$$\nu(\text{H}) = 1\,420\,405\,751.800 \pm 0.028 \text{ Hz.}$$

The experimental error of this measurement is due almost entirely to the uncertainties in the A.1 time standard.

The disadvantages and advantages of the hydrogen maser are discussed. The only significant disadvantage is the presence of a small frequency shift due to the teflon walls, but this can be experimentally measured and a 1 % measurement makes possible an absolute frequency determination to  $2 \times 10^{-13}$ .

The hydrogen maser possesses many distinct advantages as a frequency and time standard. The long storage time provides an intrinsically narrow line which cannot easily be pulled from the correct frequency. The first order Doppler shift is negligibly small and a correction for the small second order shift can easily be made by measurement of the temperature. The low noise characteristic of maser amplification assures that the frequency of oscillation will be close to the peak of the resonance curve. Since the maser is an active oscillator, no external electronics are required in the basic frequency determining elements. Since the short term stability, the long term stability, and the reliability of the maser are high, it is suitable as a continuously operating frequency and time standard. Since the hydrogen maser is a relatively new device that is not pushed to its ultimate limit, it is reasonable to expect an increase in its stability accuracy in the future.

## I. INTRODUCTION

Le maser à hydrogène atomique fournit un rayonnement de radiofréquence dont la fréquence est plus stable que celle de n'importe quel autre dispositif connu. Dans le maser à hydrogène atomique, les atomes d'hydrogène dans le niveau hyperfin supérieur sont focalisés sur l'ouverture d'un ballon de quartz convenablement enduit, qui les emmagasine pendant environ une seconde. Ce ballon est placé dans une cavité de radiofréquence cylindrique. Le rayonnement du maser se produit quand la cavité est accordée à la fréquence hyperfine de l'hydrogène. En raison du long temps de stockage qui donne une largeur de résonance très étroite, et en raison du faible bruit qui caractérise l'amplification maser, le rayonnement a une fréquence extrêmement stable. On a déjà décrit le maser à hydrogène dans plusieurs articles [1 à 4] et publié des discussions théoriques sur sa stabilité et son exactitude [3], [5], [6]; on ne répètera donc pas ces descriptions et discussions ici.

On a récemment fait, en utilisant un maser à hydrogène, une nouvelle détermination de la fréquence hyperfine de l'hydrogène en fonction de l'échelle de temps atomique A1 (T.A.1) basée sur le césium atomique; cette expérience est examinée ci-dessous. Il est intéressant de noter que l'erreur dominante dans cette mesure provient du manque de reproductibilité de l'échelle T.A.1. On examine aussi les avantages et désavantages relatifs du maser à hydrogène atomique en tant qu'étalon fondamental de temps et de fréquence.

## II. FRÉQUENCE HYPERFINE DE L'HYDROGÈNE EN FONCTION DE L'ÉCHELLE T.A.1

On a récemment utilisé le maser à hydrogène atomique pour mesurer la fréquence hyperfine de l'hydrogène en fonction de l'échelle T.A.1 basée sur le césium [6].

En admettant pour l'étalon de l'échelle T.A.1  $f(\text{Cs}) = 9\,192\,631\,770,0$  Hz, on a trouvé pour l'hydrogène atomique corrigé pour le déplacement Doppler du second ordre à 0 °K  $f(\text{H}) = 1\,420\,405\,751,800 \pm 0,028$  Hz. Les mesures furent faites en fonction de la fréquence Loran-C. Cependant, au même moment, W. Markowitz et R. G. Hall mesuraient la fréquence Loran-C en fonction de l'échelle T.A.1 déterminée par l'utilisation d'étalons à jets atomiques de césium dans huit laboratoires du monde entier, les ondes myriamétriques étant utilisées pour les comparaisons. L'hydrogène était ainsi rattaché à l'échelle T.A.1.

Les incertitudes de la mesure sont examinées en détail dans [6]. L'incertitude dans l'échelle de temps primaire (T.A.1) apportait la plus grande contribution; cette fraction de l'incertitude fut estimée à  $2 \times 10^{-11}$ . L'erreur suivante la plus importante était due aux fluctuations à court terme du signal du jet de césium NC 2001 qu'on utilisait comme étalon secondaire local dans la comparaison; on a estimé que l'erreur due à cette source était  $0,5 \times 10^{-11}$ .

Parmi les incertitudes provenant du maser à hydrogène lui-même, la plus grande était due au manque de connaissance exacte du déplacement de fréquence causé par les interactions des atomes d'hydrogène avec le récipient en quartz enduit de téflon. Le déplacement total dû aux parois pour un ballon de 15 cm était  $-0,0298$  Hz par rapport à l'espace libre sans collisions. Ce déplacement dû aux parois peut être mesuré en observant la dépendance de la fréquence par rapport au diamètre du ballon [3], [6]. Dans l'expérience décrite dans [6] l'incertitude était plus grande qu'il n'était nécessaire car l'enduit du ballon avait été partiellement contaminé par l'huile de la pompe primaire lors d'un accident survenu au cours de l'expérience. Cependant, même avec cette complication inutile, l'incertitude provenant du déplacement de fréquence dû aux parois était de  $0,2 \times 10^{-11}$ , soit seulement le dixième de celle due à l'échelle T.A.1.

Régler un maser à hydrogène pour qu'il donne la fréquence correcte implique que l'on accorde la cavité et que l'on règle le champ magnétique à une valeur connue. L'accord de la cavité était réalisé en utilisant le fait bien connu que la fréquence de l'oscillateur est entraînée par une cavité désaccordée d'une quantité proportionnelle à la largeur de résonance atomique [3]. En augmentant le flux du jet pour permettre des collisions avec échange de spin, on pouvait dans ce but multiplier la largeur de résonance jusqu'à un facteur 4. La cavité était réglée jusqu'à ce que la fréquence d'oscillation soit indépendante du flux. En plus de la relaxation, les collisions avec échange de spin peuvent introduire un très faible déplacement de fréquence [5]. Ce déplacement dépend de la largeur de résonance atomique, de la même façon que l'entraînement par la cavité, de sorte qu'en accordant la cavité par la méthode précédente toute erreur systématique de fréquence est exactement annulée quand on compense le désaccord de la cavité. Une expérience préliminaire, dans laquelle la résonance était élargie par du deutérium, confirme ce résultat dans les limites de la précision qui nous intéresse ici; des expériences plus poussées sont en cours. Par ces moyens on pouvait régler les masers indépendamment et de façon reproductible à mieux que  $1 \times 10^{-12}$ .

Le champ magnétique à l'intérieur du maser était maintenu à une faible valeur au moyen de blindages magnétiques cylindriques, et on le mesurait en observant par une technique de double résonance la fréquence des raies Zeeman qui en dépendent [2], [6]. Le déplacement de fréquence dû au champ magnétique utilisé dans l'expérience était de 0,142 Hz, mesuré avec une erreur négligeable. On fait souvent fonctionner le maser à hydrogène dans des champs magnétiques beaucoup plus faibles, pour lesquels ce déplacement est beaucoup plus petit.

La correction pour le déplacement Doppler du second ordre quand le maser fonctionne à 308 °K est  $-0,0602$  Hz. La température est mesurée avec assez de précision pour obtenir une erreur négligeable dans l'expérience.

La valeur mesurée de la fréquence hyperfine de l'hydrogène atomique concorde bien avec la valeur préliminaire publiée auparavant [2], obtenue avec le premier maser à hydrogène lorsque les premières mesures en date sont corrigées pour l'échelle T.A.1 [7] en soustrayant 10,6 Hz. De même, le résultat tombe à l'intérieur des limites beaucoup plus grandes des mesures de Wittke et Dicke [8] et Kusch [9]. Quand les résultats de Lambert et

Pipkin [10] sont rapportés à l'échelle T.A.1 [7], ils sont plus faibles que le présent résultat de deux fois leur erreur expérimentale estimée à 7 Hz. Le résultat préliminaire obtenu par Menoud et Racine pour le maser à hydrogène [11] est plus faible que notre résultat de 1 Hz, ce qui est un peu plus du double de leur erreur expérimentale de 0,4 Hz, qu'ils attribuent principalement à l'inhomogénéité de leur champ magnétique résiduel. Une valeur plus récente non publiée de ce même laboratoire [12], avec une erreur expérimentale de 0,3 Hz, s'accorde avec notre résultat dans les limites de l'erreur estimée, si l'on suppose que le déplacement dû aux parois, qu'ils n'ont pas mesuré, est le même que le nôtre. Dans des expériences récentes non publiées sur des masers à hydrogène, R. F. C. Vesot et H. C. Peters [13] ont obtenu des résultats en accord avec ceux de cet exposé si l'on suppose que le déplacement dû aux parois, qu'ils n'ont pas mesuré, est aussi le même que le nôtre, et si l'on reconnaît que les observations ont été faites à des moments différents, de sorte que la comparaison ne peut pas être plus précise que l'étalon au césium qui a servi de référence.

Des mesures dans lesquelles deux masers à hydrogène ont été fabriqués et réglés indépendamment ont concordé avec une précision de  $0,1 \times 10^{-11}$ . Cependant, de telles comparaisons n'ont été faites jusqu'ici que dans un même laboratoire. On projette de telles comparaisons entre différents laboratoires possédant des masers à hydrogène atomique, les comparaisons devant être faites au même moment de façon que la précision des résultats ne soit pas limitée par la stabilité des étalons de fréquence au césium.

Quand on a comparé deux masers à hydrogène de façon continue pendant une période de deux mois [13], on a trouvé que la valeur quadratique moyenne de la variation relative d'un maser par rapport à l'autre était  $0,05 \times 10^{-11}$ , la plus grande partie de l'instabilité étant due à un réglage insuffisant de la température. Pour des intervalles de quinze minutes, la stabilité a été de  $0,01 \times 10^{-11}$ .

### III. DÉSAVANTAGES DU MASER A HYDROGÈNE COMME ÉTALON DE FRÉQUENCE ET DE TEMPS

Le principal désavantage du maser à hydrogène comme étalon de fréquence est le petit déplacement de fréquence qui résulte du fait que les atomes passent une fraction de leur temps sur les parois du ballon qui les contient. Avec un ballon enduit de téflon, de 15 cm de diamètre, ce déplacement relatif est  $2,1 \times 10^{-11}$ . On peut cependant mesurer ce déplacement en comparant les fréquences pour des ballons de différents diamètres puisque la fraction du temps passé en collision avec les parois est inversement proportionnelle au diamètre. Même avec les ballons actuels enduits de téflon, l'incertitude causée par le déplacement dû aux parois ne devrait pas être supérieure à quelques  $10^{-13}$ . En outre, plusieurs produits prometteurs comme revêtement pour les parois seront bientôt essayés; ils pourront donner des déplacements plus petits.

Un deuxième désavantage, relativement mineur, est la faible puissance de sortie du maser ( $10^{-12}$  W). Cette puissance est cependant localisée dans une largeur de bande très étroite et on peut facilement l'amplifier à n'importe quel niveau désiré.

Le troisième désavantage est purement transitoire : jusqu'ici, relativement peu de laboratoires ont beaucoup expérimenté les masers à hydrogène atomique à cause de leur nouveauté. Cette situation pourra se modifier, car les techniques de base sont maintenant bien connues et peuvent être suivies par n'importe quel laboratoire d'étalonnage qui désirerait construire son propre maser à hydrogène. De plus, un maser à hydrogène bien conçu est maintenant disponible dans le commerce ; il peut être soit utilisé directement, soit modifié comme on le désire pour faire des essais.

#### IV. AVANTAGES DU MASER A HYDROGÈNE COMME ÉTALON DE FRÉQUENCE ET DE TEMPS

En tant qu'étalon de fréquence et de temps, le maser à hydrogène possède beaucoup d'avantages notables par rapport aux autres dispositifs.

L'étroitesse intrinsèque de la résonance fait qu'il est difficile d'entraîner la fréquence hors de la valeur correcte et contribue à la stabilité, à la sécurité et à la précision du maser. De plus, le spectre atomique de l'hydrogène est particulièrement simple et bien espacé, ce qui diminue les perturbations à partir des niveaux voisins. Le déplacement Doppler du premier ordre est négligeable et la correction pour l'effet Doppler du second ordre peut être faite facilement en mesurant la température de la cavité. En plus, le faible bruit caractéristique de l'amplification maser assure que la fréquence d'oscillation sera voisine du pic de la courbe de résonance.

Comme le maser est un oscillateur actif, aucune électronique extérieure n'est nécessaire parmi les éléments de base qui déterminent la fréquence. On évite ainsi le danger de pompage, les complications et la sûreté réduite associés aux servo-mécanismes. Un résultat de la simplicité intrinsèque du maser à hydrogène a été la facilité relative avec laquelle on l'a rendu sûr. Cette sécurité de fonctionnement est illustrée par le fait que lorsque l'on a essayé, pour la première fois, de faire fonctionner deux masers de laboratoire pendant deux mois, aucun incident ne s'est produit dans ces deux masers ; les essais ont été finalement arrêtés uniquement parce que l'on a eu besoin des masers par ailleurs. Bien que le maser à hydrogène soit un dispositif à jet atomique, la vitesse d'écoulement du gaz est suffisamment faible pour que l'on puisse disposer d'une alimentation en hydrogène pour plusieurs années et qu'un système à vide fermé avec une pompe au titane puisse fonctionner sans entretien pendant plusieurs années.

Il résulte des caractéristiques précédentes que la stabilité à court terme, la stabilité à long terme et la sûreté du maser sont grandes, et qu'il peut utilement être employé de façon continue pendant de longues durées. En conséquence, le maser à hydrogène convient comme étalon de fréquence et de temps à fonctionnement continu, et non pas comme un simple dispositif pour commander occasionnellement des oscillateurs secondaires. Ces propriétés le rendent donc convenable comme étalon de temps aussi bien que comme étalon de fréquence.

Étant donné que l'atome d'hydrogène a la plus petite polarisabilité électrique atomique et la plus petite masse atomique, cet atome devrait être le mieux adapté à un type de maser atomique à confinement, car ces deux caractéristiques contribuent à diminuer le déplacement dû aux parois.

La méthode d'accord du maser en rendant sa fréquence de sortie indépendante de la vitesse d'écoulement de l'hydrogène est commode et fournit une suppression exacte des déplacements de fréquence dus au désaccord de la cavité et aux collisions avec échange de spin.

Puisque la technique du maser à hydrogène permet d'atteindre, d'une façon relativement facile, une exactitude meilleure que  $10^{-11}$ , il est ainsi plus facile d'obtenir une telle précision avec ce dispositif qu'avec d'autres dispositifs qui doivent être poussés à leurs limites pour arriver à cette exactitude. Ceci est illustré par le fait qu'avec seulement un petit nombre de laboratoires travaillant sur ce dispositif pendant une période relativement courte, on a atteint avec le maser à hydrogène une stabilité beaucoup plus grande qu'avec d'autres dispositifs, après de nombreuses années de mise au point dans un grand nombre de laboratoires.

En conclusion, le maser à hydrogène, par sa très grande nouveauté, devrait être l'objet d'améliorations dans les années à venir. Quelques-unes de ces améliorations sont suffisamment évidentes et simples — comme une meilleure stabilisation de la température — pour qu'elles puissent conduire presque immédiatement à de meilleurs résultats, tandis que d'autres ne peuvent venir qu'après des recherches plus complètes. Parmi les améliorations probables, on trouve l'installation de meilleurs blindages magnétiques qui ont déjà été essayés sur un maser, la mise au point de produits pour le revêtement des parois donnant de plus petits déplacements, l'amélioration de la stabilité de température, l'amélioration de la stabilité mécanique, l'emploi d'une cavité de radiofréquence en quartz massif, etc. Il est raisonnable de s'attendre à ce que, avec les développements futurs, la remise en marche indépendante, la stabilité à court et à long terme, et l'exactitude absolue soient toutes  $0,01 \times 10^{-11}$ , ou mieux, pour le maser à hydrogène.

(12 novembre 1963)

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] GOLDENBERG (H. M.), KLEPPNER (D.) et RAMSEY (N. F.), *Phys. Rev. Letters*, **5**, 1960, p. 361.
- [2] KLEPPNER (D.), GOLDENBERG (H. M.) et RAMSEY (N. F.), *Applied Optics*, **1**, 1962, p. 55.
- [3] KLEPPNER (D.), GOLDENBERG (H. M.) et RAMSEY (N. F.), *Phys. Rev.*, **126**, 1962, p. 603.
- [4] RAMSEY (N. F.), *I.R.E. Trans. on Instrumentation*, I-11, 1962, p. 177.
- [5] BENDER (P.), à paraître dans *Phys. Rev.*
- [6] GRAMPTON (S. B.), KLEPPNER (D.) et RAMSEY (N. F.), *Phys. Rev. Letters*, **11**, 1963, p. 338.
- [7] MARKOWITZ (W.), *I.R.E. Trans. on Instrumentation*, I-11, 1962, p. 639.
- [8] WITKE (J. P.) et DICKE (R. H.), *Phys. Rev.*, **103**, 1956, p. 620.
- [9] KUSCH (P.), *Phys. Rev.*, **100**, 1955, p. 1188.
- [10] PIPKIN (F. M.) et LAMBERT (R. H.), *Phys. Rev.*, **127**, 1962, p. 787.
- [11] MENOUD (C.) et RACINE (J.), *Helv. Physica Acta*, **35**, 1962, p. 562.
- [12] Communication privée de P. KARTASCHOFF par l'intermédiaire de W. MARKOWITZ.
- [13] Communication privée de R. F. C. VESSOT.

## ANNEXE 9

---

### OPINIONS SUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

National Research Laboratory of Metrology  
Radio Research Laboratories  
Tokyo Astronomical Observatory

(Japon)

---

1. On souhaite que la définition actuelle de la seconde soit remplacée, aussitôt que le permettront les circonstances, par une nouvelle définition fondée sur l'étalon atomique de fréquence.

2. Le temps atomique n'étant introduit dans l'usage pratique que depuis plusieurs années, on estime que les renseignements sur la comparaison entre le temps atomique et le temps des éphémérides sont insuffisants pour que soient adoptées immédiatement une certaine transition atomique et sa valeur numérique.

On devra d'abord étudier avec quelle précision l'échelle de temps atomique éventuelle devra être concordante avec celle du temps des éphémérides.

3. Le choix d'une transition atomique devra aussi être différé pour tenir compte des études futures, car on sait que de nouveaux étalons atomiques sont en cours de développement. La reproductibilité, la stabilité et la permanence des divers étalons devront être examinées pendant une période suffisamment longue, et la précision absolue et les conditions de réalisation de ces étalons devront être élucidées.

4. Compte tenu de la commodité pour la pratique, on souhaite que soit admise l'échelle de temps atomique déterminée par la fréquence 9 192 631 770 Hz de l'étalon atomique au césium comme moyen provisoire réalisant l'échelle de temps des éphémérides.

On estime que l'échelle ainsi admise ne devra pas être changée avant l'adoption d'une décision définitive, en admettant toutefois que cette échelle n'impose aucune contrainte au choix futur de la transition atomique de base.

5. On souhaite également que soit activement poursuivie la coopération mondiale pour la comparaison plus précise des étalons atomiques de fréquence et la détermination de leur valeur numérique par rapport au temps des éphémérides, et que soit adoptée, en conséquence, une nouvelle définition dans le plus proche avenir.

(18 novembre 1963)

---

## ANNEXE 10

---

# QUELQUES CONSIDÉRATIONS SUR UNE DÉFINITION ATOMIQUE DE L'UNITÉ DE TEMPS

Par R. C. MOCKLER et J. M. RICHARDSON

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

(Traduction remise)

---

*Abstract.* — The presently attained accuracy of Cs beam frequency standards is established by several examples. Independent estimates of relative accuracy based on the quantitative uncertainty in various experimental factors and the comparison of frequency between two independent machines give  $\pm 1 \times 10^{-11}$  (one standard deviation) for each of two standards. The daily frequency difference between these two standards has remained fixed and within this accuracy for 3 years in spite of great modification to each. Intercontinental comparison of six diverse Cs standards by VLF radio gives long term (18 months) agreement to  $\pm 1 \times 10^{-10}$  for laboratory type standards. Radio comparison of two Cs controlled time scales over 1,5 years gives agreement to  $\pm 1 \times 10^{-11}$  on the average for this period. Major limitations to accuracy arise from uncertainty in the C field and from phase differences between the separated oscillatory fields exciting the atomic transitions. Both of these individual limitations have recently been reduced well below the  $1 \times 10^{-11}$  figure, allowing some promise of future improvement in overall accuracy. Preliminary results on a Tl beam give  $f_0(\text{Tl}) = 21\,310\,833\,946.5 \pm 0.4$  Hz, a relative accuracy of  $\pm 2 \times 10^{-11}$ . This relative accuracy is a preliminary estimate (one standard deviation) for a single machine. Tl standards promise future accuracy beyond this, but presently lack lengthy and widespread study. A similar statement applies to hydrogen masers. Time scales continuously controlled by atomic standards for several years have been constructed. It is shown that atomic frequency and time standards now accurate to at least  $\pm 1 \times 10^{-10}$  are both needed and available. Future progress is likely both to allow and to require refinement of any presently recommended atomic definition.

## I. INTRODUCTION

Un énorme travail de recherches a été accompli pendant les huit dernières années sur les étalons atomiques de fréquence, le plus grand effort étant concentré sur les étalons de fréquence à jet de césium. Des données

suffisantes ont été recueillies par un groupe international de laboratoires pour fournir une base raisonnablement sûre et pour attester le caractère pratique des étalons de fréquence à jet de césium. Les dispositifs atomiques ont généralement le mérite d'être non seulement des étalons de fréquence, mais encore des étalons de temps. Ils fournissent une base pour une nouvelle définition de la seconde en fonction de la différence entre les états d'énergie de l'atome.

D'autres dispositifs atomiques concurrencent le jet de césium et chacun doit être soigneusement examiné pour que le meilleur système puisse être choisi comme étalon internationalement reconnu. D'une manière pratique, il pourrait naturellement être nécessaire, ou du moins utile, de choisir l'étalon de base avant que l'on puisse soumettre tous les candidats à la soigneuse évaluation nécessaire.

## II. ÉTALONS ATOMIQUES DE FRÉQUENCE ET DE TEMPS AU N.B.S.

Deux étalons de fréquence de laboratoire à jet de césium ont été étudiés et comparés pendant une période de trois ans [1]. Au cours de cette période tout le système électronique fut pratiquement remplacé ainsi qu'un certain nombre des composants internes de l'appareillage du jet, y compris des aimants de déviation, des montages pour le champ uniforme (« C field ») et l'excitation radiofréquence du plus petit appareil. De plus, les deux appareils furent partiellement démontés et transportés dans un autre laboratoire. Avec tous ces changements la différence relative de fréquence entre les deux n'en resta pas moins fixée à  $1,6 \times 10^{-11}$  avec une incertitude de mesure inférieure à  $\pm 2 \times 10^{-12}$  (écart-type de la moyenne,  $\sigma_m$ ) (1). La stabilité caractéristique était  $\pm 2 \times 10^{-12}$  ( $\sigma_m$ ) la moyenne portant sur une durée d'une demi-heure. La meilleure stabilité obtenue était de  $\pm 2 \times 10^{-13}$  ( $\sigma_m$ ), la moyenne portant sur 10 heures. Le comportement statistique était bon. Les tests du  $\chi^2$  ont montré une distribution gaussienne des résultats [2].

On considère que l'exactitude relative, exprimée comme un écart-type, est  $\pm 1 \times 10^{-11}$  pour chaque appareil. Cette valeur est en partie basée sur les résultats d'un groupe d'expériences auxiliaires mesurant l'intensité et l'uniformité du champ, la variation de phase entre les deux régions soumises au champ oscillant, le spectre de puissance de la radiation excitatrice, les effets des résonances voisines, l'entraînement par la cavité et la variation de fréquence avec la puissance. L'incertitude globale sur la fréquence de résonance due à ces diverses causes a été déterminée pour chacun des appareils. La valeur ci-dessus de l'exactitude est aussi basée en partie sur la différence fixe de fréquence observée, en considérant que les appareils constituent un échantillon de deux éléments. Les évaluations de l'exactitude selon ces deux bases sont concordantes : en fait, la somme des incertitudes pour chaque appareil dépasse légèrement la différence

---

(1) Dans la suite de ce rapport, le symbole  $\sigma$  après une indication numérique de stabilité ou d'exactitude signifiera l'écart-type estimé, et le symbole  $\sigma_m$  signifiera l'écart-type estimé de la moyenne calculée en supposant l'indépendance des observations individuelles.

fixe de fréquence mesurée,  $1,6 \times 10^{-11}$ . L'évaluation de l'exactitude doit être considérée comme approximative puisqu'elle n'est obtenue qu'au moyen de deux éléments. Trois écarts-types,  $\pm 3 \times 10^{-11}$  ( $3\sigma$ ), seraient donc une évaluation plus prudente.

Cette différence fixe de fréquence observée est toujours intrigante et elle implique l'existence d'une erreur systématique qui n'a pas encore été identifiée. Une étude plus approfondie sur ce point est nécessaire.

L'influence des transitions voisines sur la fréquence de la transition ( $F = 4, M_F = 0$ )  $\leftrightarrow$  ( $F = 3, M_F = 0$ ) peut être éliminée en utilisant des champs suffisamment élevés.

Des servo-mécanismes ont été installés sur les deux appareils. Après une mise au point approfondie, les mesures manuelles et par servo-mécanismes ont été comparées; elles coïncidaient à  $\pm 2 \times 10^{-12}$  près (écart-type de la moyenne,  $\sigma_m$ ) [2]. Puis, durant une année, la concordance s'est maintenue dans la marge de précision des comparaisons ( $\pm 2 \times 10^{-12}$ ,  $\sigma_m$ ).

Jusqu'à une époque récente, on considérait que l'exactitude était limitée surtout par les incertitudes sur le champ uniforme [1]. Des essais ont maintenant été effectués sur l'un des appareils (désigné par NBS II); ils indiquent que l'incertitude relative de la fréquence due aux seules incertitudes sur le champ uniforme a été réduite à  $\pm 2 \times 10^{-13}$  ( $\sigma$ ). C'est là un progrès important par rapport à la limitation antérieure de  $\pm 5 \times 10^{-13}$  ( $\sigma$ ) due à l'incertitude sur le champ uniforme. Ce progrès résulte simplement de l'emploi d'une source de courant plus stable pour le champ et un moyen plus précis pour mesurer ce courant.

Pour être plus exact, l'incertitude sur le champ uniforme était surtout déterminée auparavant par le degré d'exactitude avec lequel le courant produisant ce champ pouvait être reproduit, puisqu'on ne mesure pas le champ chaque fois que l'on mesure la fréquence. Les limitations liées à la reproduction de ce courant introduisaient une incertitude dans le champ de  $\pm 1,1$  millioersted ( $\pm 0,09$  A/m), correspondant à une incertitude relative sur la fréquence de  $\pm 5 \times 10^{-13}$  ( $\sigma$ ). Maintenant, en revanche, le courant peut être reproduit avec beaucoup plus de précision grâce à une nouvelle source d'énergie. En conséquence, la limitation d'attribution d'une valeur au champ uniforme est réduite à la non-uniformité du champ. Les transitions (4,1)  $\leftrightarrow$  (3,1), (4,2)  $\leftrightarrow$  (3,2) et (4,3)  $\leftrightarrow$  (3,3) permettent de mesurer le champ moyen entre les deux champs oscillants. Désignons ce champ moyen par  $\overline{H(x)}$ ,  $x$  étant l'abscisse, mesurée le long du jet, du commencement du premier champ à la fin du second. Ces trois transitions donnent le même résultat pour  $\overline{H(x)}$  à mieux que  $\pm 0,03$  millioersted (0,002 A/m). La fréquence de la transition étalon fait intervenir la moyenne du carré du champ  $\overline{H(x)^2}$  et non  $[\overline{H(x)}]^2$  qui est donné par les transitions ci-dessus, sensibles au champ. L'incertitude sur la mesure de la fréquence étalon est donnée par la différence  $\overline{H(x)^2} - [\overline{H(x)}]^2$ . Une valeur de  $\overline{H(x)^2}$  a été obtenue par le relevé graphique du champ uniforme au moyen d'une petite sonde fluxmètre stable à  $\pm 0,01$  millioersted (0,001 A/m), déplacée continûment le long du jet dans la région du champ. L'incertitude relative sur la fréquence de la transition (4,0)  $\leftrightarrow$  (3,0) est estimée à  $\pm 2 \times 10^{-13}$  ( $\sigma$ ).

Un changement de fréquence est dû à une variation de phase entre les

régions soumises aux deux champs oscillants du dispositif d'excitation de Ramsey. Ce changement peut être mesuré et corrigé en permutant simplement ces deux régions. La mesure peut être effectuée avec la précision de détermination de la fréquence étalon. Le changement reste fixe, dans les limites de  $\pm 2 \times 10^{-12}$ , pendant de longues périodes (jusqu'à trois ans pour les appareils du N.B.S.). Il semble raisonnable de supposer qu'avec la précision de mesure actuelle de  $\pm 2 \times 10^{-13}$  ( $\sigma_m$ ), ce changement puisse être mesuré à  $\pm 2 \times 10^{-13}$  ( $\sigma_m$ ) bien que des variations dans le changement puissent apparaître avec le temps. Supposons, en vue d'évaluer une exactitude future pour le jet de césium, que la variation de phase puisse être mesurée à  $\pm 1 \times 10^{-12}$  ( $\sigma$ ). Ce nombre, joint à l'incertitude sur le champ de  $\pm 2 \times 10^{-13}$  ( $\sigma$ ) et à une précision de mesure de  $\pm 2 \times 10^{-13}$  ( $\sigma_m$ ), conduit à estimer à  $\pm 1,0 \times 10^{-12}$  ( $\sigma$ ) l'exactitude future de l'étalon au césium. Cette valeur est ce que nous pourrions espérer d'après les dispositifs existants après une analyse approfondie et peut-être quelques petites modifications. Cependant, il faut attirer l'attention sur le fait qu'une recherche beaucoup plus minutieuse des dégradations apportées par les dispositifs électroniques doit être effectuée. On doit aussi rappeler que pendant les trois années de comparaison des deux appareils du N.B.S. il y a eu une différence de fréquence fixe de  $1,6 \times 10^{-11}$  qui n'a jamais été expliquée, bien qu'elle n'ait pas dépassé les incertitudes estimées pour cette période. Nous espérons qu'un nouvel appareil à jet de césium, maintenant en cours d'essai, nous éclairera un peu sur ce problème. Aucune amélioration de l'exactitude ne peut être espérée sans la compréhension de cette différence. Avec l'augmentation de la précision on peut s'attendre, bien sûr, à ce que d'autres influences contribuent à des variations de fréquence systématiques.

Jusqu'à une époque récente, l'exactitude avec laquelle la transition du césium pouvait être mesurée était surtout limitée par la sensibilité de cette transition au champ magnétique. La transition de thallium est beaucoup moins sensible et possède l'avantage supplémentaire d'avoir un spectre beaucoup plus simple.

Au N.B.S., l'étalon à jet de césium le plus court (et le plus ancien) a été modifié il y a un peu plus d'un an pour observer la transition  $(1,0) \leftrightarrow (0,0)$  du thallium. La précision caractéristique pour cette mesure de fréquence est  $\pm 2 \times 10^{-12}$  ( $\sigma_m$ ) et la précision maximale un jour donné  $4 \times 10^{-13}$  ( $\sigma_m$ ) [3]. Dans les expériences initiales, la rotation du guide d'onde d'excitation n'a pas donné de résultats reproductibles. Cette rotation est effectuée afin de mesurer la variation de fréquence produite par une différence de phase entre les champs oscillants. La mesure demande que la structure de la cavité résonnante ne change pas pendant la rotation. Après avoir rendu la construction plus rigide, une bonne reproductibilité a été obtenue. Actuellement, la dispersion des mesures d'un jour à l'autre (écart-type  $\approx 1 \times 10^{-13}$ ) n'est pas répartie suffisamment au hasard, comme on le déterminerait d'après un test du  $\chi^2$ . Les anciens aimants employés dans l'appareil au thallium ne produisent pas une déviation convenable du jet. En conséquence, l'alignement du jet est sensible aux variations de température et change légèrement avec le temps. Ceci peut être une source de difficulté, mais aucune expérience définitive n'a été faite pour identifier les erreurs systématiques restantes. La mesure préliminaire

de fréquence pour la séparation de la structure hyperfine du thallium est

$$f_0(\text{Tl}) = 21\,310\,833\,946,5 \pm 0,4 \text{ Hz} \quad (\text{ou } \pm 2 \times 10^{-11}, \sigma).$$

A cause de la dispersion assez grande des résultats obtenus d'un jour à l'autre, il est impossible de déterminer la variation de fréquence due à une variation de phase entre les champs oscillants à mieux que  $\pm 1 \times 10^{-11}$  ( $\sigma$ ). On espère qu'en employant des aimants à plus grande puissance défectrice certaines de ces difficultés seront résolues.

L'exactitude de ces résultats préliminaires pour le thallium n'est pas encore aussi bonne que pour le césium. Cependant, la précision assez bonne obtenue sur un seul jour de mesure semble indiquer qu'on pourra atteindre dans le futur une exactitude de  $\pm 1$  à  $2 \times 10^{-12}$  ( $\sigma$ ) avec le thallium.

Le N.B.S. doit avoir sous peu un maser à hydrogène en fonctionnement, de sorte que nous pourrons évaluer ses possibilités en tant qu'étalon primaire de fréquence. Nous n'avons toutefois encore aucune expérience du maser à hydrogène.

### III. COMPARAISON INTERNATIONALE D'ÉTALONS ATOMIQUES DE FRÉQUENCE PAR SIGNAUX RADIO

On a étudié les résultats obtenus pendant une période de dix-huit mois (juillet 1961 à décembre 1962 inclus) lors de la comparaison d'étalons atomiques situés dans six laboratoires aux États-Unis, en Europe et au Canada, effectuée en utilisant les ondes myriamétriques des stations GBR (16 kHz), Rugby, Grande-Bretagne, et NBA (18 kHz), Balboa, Zone du Canal [4]. Chaque laboratoire fait fonctionner un ou plusieurs étalons atomiques, qu'ils soient conçus et construits par le laboratoire ou bien commerciaux (Atomichrons), et fait des mesures quotidiennes des deux stations ci-dessus. Chacun publie, par communication privée, l'écart des signaux reçus par rapport à la valeur nominale définie par son propre étalon atomique. Les valeurs publiées sont des moyennes sur 24 heures, centrées approximativement sur la même heure.

Les laboratoires participants sont : Centre National d'Études des Télécommunications (C.N.E.T.) Bagnaux, Seine, France; Cruft Laboratory, Harvard University, Cambridge, Mass., États-Unis; Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères (L.S.R.H.), Neuchâtel, Suisse; National Bureau of Standards (N.B.S.), Boulder, Colo., États-Unis; National Physical Laboratory (N.P.L.), Teddington, Mddx., Royaume-Uni; Conseil National de Recherches (N.R.C.), Ottawa, Ont., Canada. On a également inclus les résultats de l'U.S. Naval Observatory (N.O.), Washington, D.C., États-Unis, qui a obtenu un « étalon atomique moyen » en utilisant les résultats pondérés des autres laboratoires.

L'analyse statistique employée était une forme d'analyse de variance. Elle fut établie pour essayer de séparer les observations relatives à chaque laboratoire en trois parties : 1° les différences moyennes à long terme parmi les étalons atomiques; 2° l'évaluation des écarts-types  $\alpha_i$  à chaque station réceptrice; 3° l'évaluation des écarts-types de l'émetteur  $\tau$ . Chacune des deux dernières évaluations consiste en plusieurs facteurs :  $\alpha_i$  comprend

les effets des fluctuations du dispositif récepteur, les effets de propagation particuliers à chaque trajet radio et les incertitudes de mesure;  $\tau$  comprend les fluctuations des signaux de l'émetteur et les effets de propagation communs à tous les trajets radio.

L'étude montre que le  $\alpha_i$  à chaque récepteur a varié entre un minimum de  $0,39 \times 10^{-10}$  (signaux GBR) au L.S.R.H. et un maximum de  $1,97 \times 10^{-10}$  (signaux GBR) au N.R.C. avec, pour l'ensemble des stations, une moyenne de  $0,88 \times 10^{-10}$  lorsque la mesure est effectuée par rapport à GBR et de  $0,99 \times 10^{-10}$  lorsqu'elle est effectuée par rapport à NBA.

De plus, la moyenne  $\tau$  pour GBR est  $1,25 \times 10^{-10}$  et pour NBA  $0,68 \times 10^{-10}$ .

Finalement, on a montré que: 1° tous les étalons atomiques étaient en concordance avec leur moyenne générale à  $2 \times 10^{-10}$  près pour la période de dix-huit mois; 2° les étalons du type laboratoire concordait à  $1 \times 10^{-10}$  près ou mieux.

En plus de la comparaison de fréquence par signaux radio, il est aussi possible de comparer les échelles de temps déterminées par les étalons atomiques [5], [6]. Une comparaison a été effectuée [7], dans laquelle l'échelle de temps NBS-A maintenue à Boulder a été comparée au moyen des signaux WWV à l'échelle TA<sub>1</sub> maintenue à Neuchâtel. Chacune des échelles est déterminée par les étalons atomiques de fréquence respectifs. Le taux de divergence de deux telles échelles, déterminé pendant des périodes de plusieurs mois ou plusieurs années dans le but de lisser les données expérimentales, est une mesure de l'accord entre deux étalons atomiques. Les résultats de cette comparaison particulière montrent que depuis 1962,2 le taux de divergence entre NBS-A et TA<sub>1</sub> a été d'environ  $1 \times 10^{-11}$ . La précision de mesure était assez élevée pour permettre une comparaison facile des étalons à  $10^{-11}$  près pendant un an. Ce taux de divergence est compatible avec les exactitudes des deux étalons atomiques, évaluées à  $\pm 1 \times 10^{-11}$ .

#### IV. CONCLUSIONS

De ce qui précède et de ce que l'on sait déjà sur les étalons atomiques de fréquence, on peut tirer certaines conclusions concernant l'adoption d'une unité atomique de temps.

Il est prouvé que l'on a maintenant besoin d'étalons de fréquence et de temps atteignant des précisions d'au moins  $10^{-10}$  et que ces étalons sont disponibles. De telles exigences se manifestent, par exemple, dans les systèmes de navigation précis tels que le Loran C et les systèmes Doppler déterminant la distance et la vitesse (Doppler range and range rate systems) qui exigent maintenant  $1 \times 10^{-9}$  pour leur fonctionnement, dans la production de fréquences stables pour l'étude des phénomènes de propagation des ondes myriamétriques, dans les problèmes de synchronisation à distance à 10 microsecondes près pendant un jour entier.

Des transitions du césium, de l'hydrogène, du thallium et de l'ammoniac peuvent être considérées comme une base pour l'unité de temps.

Jusqu'à présent, c'est la transition du césium qui a été la plus complètement étudiée du point de vue de la durée et de la diversité des observations

par de nombreux laboratoires indépendants. L'exactitude actuelle par rapport à la différence entre états non perturbés peut être prise égale à environ  $1 \times 10^{-11}$ . Il est possible d'obtenir une amélioration, peut-être d'un facteur dix, en prêtant attention à des limitations connues, telles que la stabilité du champ de polarisation et la variation de phase de l'oscillation radio. La transition de l'ammoniac a bénéficié d'observations longues et variées, mais ne tient pas la promesse d'une exactitude meilleure que  $1 \times 10^{-11}$ . Les transitions de l'hydrogène et du thallium tiennent cette promesse, mais elles ne bénéficient pas encore d'observations longues et variées.

Une unité atomique de temps peut être rattachée à l'unité actuelle de temps (1/31 556 925,974 7 de l'année tropique pour 1900 Janvier 0 à 12 h T.E.) à  $22 \times 10^{-10}$  près, ce qui est l'incertitude de l'unité actuelle. Le choix, pour une unité atomique, de n'importe quelle valeur à l'intérieur de cette marge d'incertitude semble également acceptable pour satisfaire à la fois les buts de l'astronomie et de la physique.

Étant donné un étalon de fréquence, il est possible, avec très peu d'efforts supplémentaires, d'établir par intégration une échelle de temps basée sur cet étalon. De telles échelles sont propres à l'étalon particulier en question. Plusieurs de ces échelles ont été obtenues suivant différentes techniques : intégration manuelle ou électronique sur des périodes de 4 à 5 ans. Ces échelles fournissent un moyen de mesurer des intervalles de longue durée, intéressants dans certaines mesures physiques ; en revanche, elles ne diminuent d'aucune façon l'importance de l'époque dans les échelles astronomiques de temps. Il continuera d'être important de fournir l'époque de temps astronomique et il sera également important de rattacher les échelles atomiques de temps aux échelles astronomiques de temps.

L'adoption proposée d'une unité atomique de temps a quelques conséquences pour les services qui diffusent la fréquence et le temps. Plusieurs compromis entre la diffusion de la fréquence et du temps atomiques et la diffusion du T.U.2 sont possibles. Ces compromis comprennent l'usage de fréquences décalées, de variations de phase dans les signaux horaires, ou d'une double modulation pour fournir à la fois le temps atomique et le T.U.2. La question de la plus grande commodité pour le plus grand nombre d'utilisateurs peut être soumise au Comité Consultatif International des Radiocommunications pour être résolue.

Il semble certain que la technique des étalons atomiques de fréquence et de temps progressera dans les prochaines années. De tels progrès peuvent être dus à l'emploi d'autres transitions pouvant être utilisées avec une plus grande précision, ainsi qu'à la spécification de certaines conditions imposées par la relativité restreinte et généralisée, telles que la réduction à un système de coordonnées d'inertie. Il faut donc continuer à prêter attention à la question d'une définition appropriée à la seconde. Des changements de définition seront aussi nécessaires avec les progrès de la technique et de la précision.

Ce rapport est basé sur le travail de nombreuses personnes au N.B.S., notamment de R. E. Beehler, W. R. Atkinson, J. A. Barnes, A. H. Morgan, D. J. Glaze, L. J. Newman, B. E. Blair et E. L. Crow, auxquels les auteurs expriment leurs remerciements.

(reçu le 26 novembre 1963 ;  
rédaction modifiée le 4 février 1964)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MOCKLER (R. C.), BEEHLER (R. E.) et SNIDER (C. S.), Atomic beam frequency standards, *I.R.E. Trans. on Instrumentation*, I-9, 1960, p. 120.  
MOCKLER (R. C.), Atomic beam frequency standards, *Advances in Electronics and Electron Physics*, 15, 1961, p. 1.  
RICHARDSON (J. M.), BEEHLER (R. E.), MOCKLER (R. C.) et FEY (R. L.), Les étalons atomiques de fréquence au N.B.S., *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde*, 2<sup>e</sup> Session, 1961, p. 57.
- [2] BEEHLER (R. E.), ATKINSON (W. R.), HEIM (L. E.) et SNIDER (C. S.), A comparison of direct and servo methods for utilizing cesium beam resonators as frequency standards, *I.R.E. Trans. on Instrumentation*, I-11, 1962, p. 231.
- [3] BEEHLER (R. E.) et GLAZE (D. J.), Experimental evaluation of thallium beam frequency standard, in *Proceedings of the 17th Annual Frequency Control Symposium*, 1963.
- [4] MORGAN (A. H.), BLAIR (B. E.) et CROW (E. L.), The international comparison of atomic standards via VLF signals, presented before the U.R.S.I. General Assembly Commission I, Tokyo, Japan, September 1963 (en cours de publication).
- [5] NEWMAN (L. J.), FEY (R. L.) et ATKINSON (W. R.), A comparison of two independent atomic time scales, *Proc. I.E.E.E.*, 51, 1963, p. 498.
- [6] BARNES (J. A.) et FEY (R. L.), Synchronization of two remote atomic time scales, *Proc. I.E.E.E.*, 51, 1963, p. 1665.
- [7] BONANOMI (J.), KARTASCHOFF (P.), NEWMAN (L. J.), BARNES (J. A.) et ATKINSON (W. R.), A comparison of the TA<sub>1</sub> and the NBS-A atomic time scales (à paraître dans *Proc. I.E.E.E.*).

## ANNEXE 11

# CONSIDÉRATIONS SUR LES ÉTALONS ATOMIQUES DE FRÉQUENCE, L'UNITÉ DE TEMPS ET L'ÉCHELLE DE TEMPS ATOMIQUE

Par J. BONANOMI et P. KARTASCHOFF

Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères  
et Observatoire Cantonal, Neuchâtel (Suisse)

*Abstract.* — At present, only the h.f.s. transitions of cesium, thallium and hydrogen seem to be suitable for a new definition of the second. Hydrogen appears to be the most favorable, but progress in the field is very rapid. Any rigid definition risks therefore to become obsolete in a few years. The need for an atomic definition being urgent, it is suggested that this principle should be adopted but that the final choice of a specific transition should be made when the present rate of progress has slowed down.

It is shown that during the last six years the atomic time scales have been very reliable. Comparisons between Neuchâtel and Boulder show a maximum variation of 9 ms in six years.

### I. ÉTAT ACTUEL DU DÉVELOPPEMENT DES ÉTALONS ATOMIQUES DE FRÉQUENCE

Les trois transitions de structure hyperfine des atomes du césium, de l'hydrogène et du thallium semblent être, à l'heure actuelle, les seules susceptibles d'assurer une définition de la seconde à la précision exigée. D'autres transitions envisagées se trouvent encore à un stade d'étude trop peu avancé (transitions millimétriques) ou ne présentent pas de garantie suffisante de précision (par exemple  $\text{NH}_3$ ).

1. Le résonateur à césium ( $f = 9\,192\text{ MHz}$ ) présente les avantages suivants : sa fréquence a été mesurée par un grand nombre de laboratoires, pendant plusieurs années; la précision est passée de  $10^{-10}$  à  $10^{-11}$  et rien ne permet d'exclure que  $10^{-12}$  ou  $10^{-13}$  sera atteint. D'autre part, un facteur en faveur du césium est la relative facilité avec laquelle un étalon peut être construit et exploité. Grâce à ce dernier facteur, les étalons à césium sont répandus dans le monde entier et le seraient encore davantage si le césium était choisi comme étalon primaire.

La figure 1 illustre les comparaisons de fréquence, effectuées par transmissions en ondes myriamétriques, entre les étalons construits et situés au N.B.S. (États-Unis d'Amérique), au N.P.L. (Royaume-Uni) et au L.S.R.H. (Suisse).

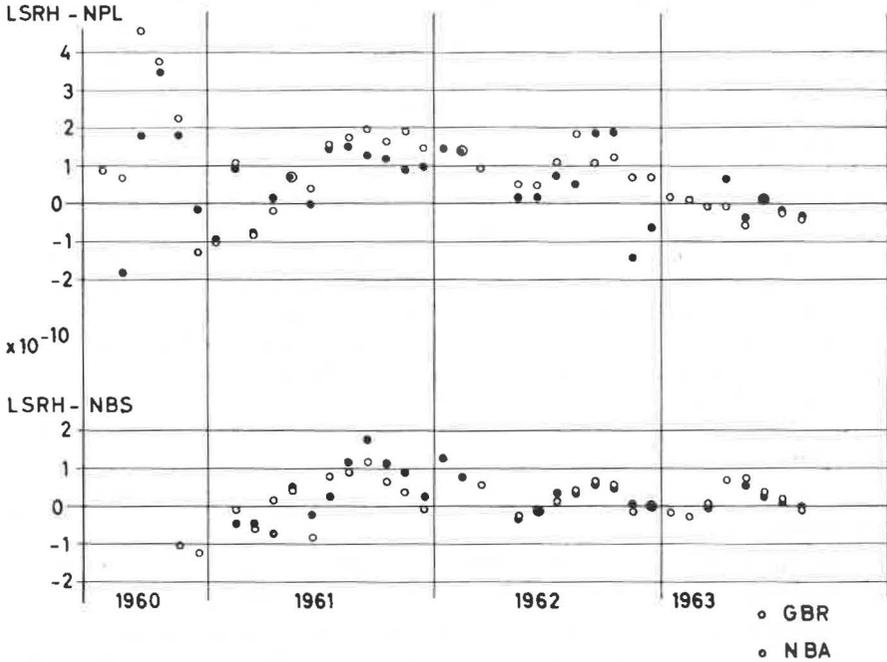


Fig. 1. — Comparaisons de fréquence entre les étalons du N.B.S., du N.P.L. et du L.S.R.H.

2. Le maser à hydrogène ( $f = 1\,420$  MHz) a fourni jusqu'ici la plus grande précision grâce aux mesures effectuées à l'Université Harvard [1], et aux laboratoires Varian-Bomac [2] (voir Annexes 8 et 4). L'exactitude des masers à hydrogène semble être à l'heure actuelle de  $2 \times 10^{-12}$  et pourra vraisemblablement être améliorée jusqu'à  $3 \times 10^{-13}$  dans un proche avenir [3].

3. Les premiers résonateurs au thallium ( $f = 21\,310$  MHz) n'ont été réalisés que très récemment. Les avantages du thallium sont l'effet Zeeman très faible et le rapport signal-bruit de fond très élevé avec lequel la résonance peut être observée. Les deux premières mesures de la fréquence du thallium [4], [5] présentent un écart de  $6 \times 10^{-11}$ , explicable par le caractère préliminaire des mesures. Les appareillages actuellement en cours de construction visent une exactitude de  $10^{-12}$ , bien qu'aucune limite pratique ou théorique n'exclue des exactitudes encore bien supérieures.

## II. LE PROBLÈME DU CHOIX DE LA TRANSITION

Actuellement, la fréquence de l'hydrogène peut être reproduite avec la plus grande exactitude et semble, de ce fait, devoir s'imposer comme choix logique pour une nouvelle définition de l'unité de temps. Il faut toutefois considérer que la mise au point des étalons de fréquence fait encore

de rapides progrès et que la précision s'améliore d'un ordre de grandeur tous les deux ans environ, sans que l'on puisse déceler, à l'heure actuelle, un ralentissement de cette évolution. Dès lors, l'adoption d'une définition rigide de la fréquence de l'hydrogène nous paraît prématurée et inopportune.

A titre d'illustration, indiquons que, depuis 1955, l'avis des spécialistes sur le meilleur choix est passé successivement du temps des éphémérides au césium et, finalement, à l'hydrogène. De plus, depuis 1957, bien que l'unité légale de temps ait été la seconde de temps universel puis la seconde des éphémérides, toutes les mesures de haute précision ont été effectuées par rapport à des transitions atomiques. Une telle situation où l'unité de travail n'est pas l'unité légale risque fort de se reproduire si une transition spécifique est proposée et par la suite adoptée pour la définition de la seconde.

L'adoption d'une nouvelle définition ne présente en effet aucun caractère d'urgence. Depuis qu'il existe des étalons atomiques de fréquence (1955), toutes les mesures de précision ont été rapportées au césium pour lequel une fréquence partiellement arbitraire a été acceptée universellement. Aucune confusion n'a résulté de cet état de fait et aucune confusion n'est à prévoir lorsque les mesures de précision seront rapportées à un autre étalon (hydrogène, thallium ou autre).

De ce qui précède, nous déduisons qu'il serait souhaitable que le Comité Consultatif recommande :

1° que la définition de l'unité de temps soit basée sur une transition atomique;

2° que le choix de cette transition soit remis jusqu'à une date ultérieure, lorsque les progrès actuellement en cours se seront ralentis;

3° que les rapports entre les fréquences des transitions entrant en ligne de compte soient déterminés de manière indépendante dans différents laboratoires, avec la plus grande précision possible.

### III. FIABILITÉ DE L'ÉCHELLE DE TEMPS ATOMIQUE

L'objection a été soulevée (voir Annexe 5) qu'une échelle de temps, basée sur des étalons atomiques, ne présenterait pas la fiabilité de l'échelle du temps universel ou du temps des éphémérides. Toutefois, les résultats obtenus jusqu'ici semblent prouver le contraire :

Un temps atomique a été conservé d'une façon indépendante en plusieurs endroits au cours des dernières années et aucune panne majeure ne s'est produite qui aurait causé l'interruption de la conservation permanente du temps atomique. La figure 2 montre une comparaison des échelles de temps atomique  $TA_1$  de Neuchâtel et NBS-A du National Bureau of Standards, Boulder. Au cours de l'intervalle de temps couvert par les mesures (6 ans), la variation maximale est de 9 ms, bien que les étalons de référence aient été changés à plusieurs reprises au cours de cet intervalle. En particulier, le temps atomique de Neuchâtel a été basé sur des étalons à ammoniac jusqu'en 1960, ensuite sur des étalons au césium et, plus récemment, aussi sur des étalons au thallium [6].

La figure 3 donne la comparaison entre  $TA_1$  (Neuchâtel) et A1, temps conservé par le Naval Observatory, Washington.

(25 novembre 1963)



BIBLIOGRAPHIE

- [1] CRAMPTON (S. B.), KLEPPNER (D.) et RAMSEY (N. F.), *Phys. Rev. Letters*, **11**, 1963, p. 338.
  - [2] VESSOT (R. F. C.) et PETERS (H. C.), *I.R.E. Trans. on Instrumentation*, **I-11**, 1962, p. 183.
  - [3] VANIER (J.) et VESSOT (R. F. C.), Tuning of the hydrogen maser (à paraître dans *Phys. Rev. Letters*).
  - [4] BONANOMI (J.), *I.R.E. Trans. on Instrumentation*, **I-11**, 1962, p. 212.
  - [5] BEEHLER (R. E.) et GLAZE (D. J.), Proc. 17<sup>th</sup> Annual Frequency Control Symposium, p. 392, U. S. Army Electronics R. and D. Laboratory, Ft. Monmouth N. J.
  - [6] BONANOMI (J.), KARTASCHOFF (P.), NEWMAN (J.), BARNES (J. A.) et ATKINSON (W. R.), A comparison of the TA<sub>1</sub> and the NBS-A atomic time scales (à paraître dans *Proc. I.E.E.E.*, Correspondance Section).
-

# TABLE DES MATIÈRES

## COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE 3<sup>e</sup> Session (1963)

	Pages.
Avertissement historique .....	5
Liste des Membres .....	7
Ordre du Jour de la Session.....	10
Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par B. Decaux .....	11
Compte rendu des expériences effectuées sur les étalons atomiques de fréquence et comparaisons d'étalons dans un même laboratoire et par radiotrans- missions .....	12
Comparaison des échelles atomiques de temps .....	15
Détermination de la seconde de temps des éphémérides .....	15
Conditions générales d'un changement de définition de la seconde (Aspects généraux du problème. Arguments pour et contre l'adoption immédiate d'une définition atomique de l'unité de temps. Discussion de deux projets de recommandation) .....	16
<i>Recommandation S 1</i> (Discussion, adoption, texte).....	20
<b>Annexes</b>	
1. N.P.L. (Royaume-Uni). — <i>L'unité de temps</i> , par L. Essen .....	23
2. U.S. Naval Observatory. — <i>Nouvelle définition de l'unité de temps</i> , par W. Markowitz .....	27
3. U.R.S.I. — <i>Texte des résolutions 1 et 2 adoptées par la Commission 1 au   cours de l'Assemblée Générale de l'U.R.S.I. tenue à Tokyo en septembre   1963</i> .....	32

4. Varian-Bomac Laboratories, Beverly (États-Unis d'Amérique). — <i>Note sur la stabilité du maser à hydrogène</i> , par R. F. C. Vessot .....	34
5. Bureau des Longitudes (France). — <i>La définition d'une unité de temps</i> .....	37
6. B.I.H. — <i>Sur la conservation de l'échelle du temps atomique intégré et la précision des étalons atomiques</i> , par M <sup>me</sup> A. Stoyko et N. Stoyko.....	40
7. P.T.B. (Allemagne). — <i>Réalisation des unités de temps et de fréquence à la P.T.B.</i> , par H. Bayer, G. Becker, G. Ohl, W. Schaffeld et R. Süß.....	45
8. Harvard University, Cambridge (États-Unis d'Amérique). — <i>Le maser à hydrogène atomique comme étalon de fréquence et de temps</i> , par N. F. Ramsey et D. Kleppner .....	50
9. N.R.L.M., Radio Res. Lab., Tokyo Astr. Obs. (Japon). — <i>Opinions sur la définition de la seconde</i> .....	56
10. N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — <i>Quelques considérations sur une définition atomique de l'unité de temps</i> , par R. C. Mockler et J. M. Richardson.	58
11. L.S.R.H. et Observatoire Cantonal, Neuchâtel (Suisse). — <i>Considérations sur les étalons atomiques de fréquence, l'unité de temps et l'échelle de temps atomique</i> , par J. Bonanomi et P. Kartaschoff .....	66