

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE
SESSION DE 1967



COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

COMITÉ CONSULTATIF

POUR

LA DÉFINITION DE LA SECONDE

4^e SESSION — 1967

(12-13 juillet)



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
Pavillon de Breteuil, F 92-SÈVRES, France



AVERTISSEMENT HISTORIQUE

Le Bureau International des Poids et Mesures a été créé par la *Convention du Mètre* signée à Paris le 20 mai 1875 par dix-sept États, lors de la dernière séance de la Conférence Diplomatique du Mètre. Cette Convention a été modifiée en 1921.

Le Bureau International a son siège près de Paris, dans le domaine du Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) mis à sa disposition par le Gouvernement français; son entretien est assuré à frais communs par les États membres de la Convention du Mètre (1).

Le Bureau International a pour mission d'assurer l'unification mondiale des mesures physiques; il est chargé :

- d'établir les étalons fondamentaux et les échelles des principales grandeurs physiques et de conserver les prototypes internationaux;
- d'effectuer la comparaison des étalons nationaux et internationaux;
- d'assurer la coordination des techniques de mesure correspondantes;
- d'effectuer et de coordonner les déterminations relatives aux constantes physiques fondamentales.

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

La Conférence Générale est formée des délégués de tous les États membres de la Convention du Mètre et se réunit au moins une fois tous les six ans. Elle reçoit à chacune de ses sessions le *Rapport du Comité International* sur les travaux accomplis, et a pour mission :

- de discuter et de provoquer les mesures nécessaires pour assurer la propagation et le perfectionnement du *Système International d'Unités (SI)*, forme moderne du *Système Métrique*;
- de sanctionner les résultats des nouvelles déterminations métrologiques fondamentales et les diverses résolutions scientifiques de portée internationale;
- d'adopter les décisions importantes concernant l'organisation et le développement du Bureau International.

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

Limitées à l'origine aux mesures de longueur et de masse et aux études métrologiques en relation avec ces grandeurs, les activités du Bureau International ont été étendues aux étalons de mesure électriques (1927), photométriques (1937) et des 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 1963-1964 pour les laboratoires de la Section des radiations ionisantes.

(1) Au 31 décembre 1967, quarante États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne, Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Canada, Chili, Corée, Danemark, Dominicaine (Rép.), Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Irlande, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République Arabe Unie, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Vénézuéla, Yougoslavie.

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

Les Comités Consultatifs ont un règlement commun (*Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 81, 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 sept :

1. Le *Comité Consultatif d'Électricité*, créé en 1927.
2. Le *Comité Consultatif de Photométrie*, créé en 1933 (de 1930 à 1933 le Comité précédent s'est occupé des questions de photométrie).
3. Le *Comité Consultatif de Thermométrie*, créé en 1937.
4. Le *Comité Consultatif pour la Définition du Mètre*, créé en 1952.
5. Le *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde*, créé en 1956.
6. Le *Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Radiations Ionisantes*, créé en 1958.
7. Le *Comité Consultatif des Unités*, créé en 1964.

Les travaux de la Conférence Générale, du Comité International, des Comités Consultatifs et du Bureau International sont publiés par les soins de ce dernier dans les collections suivantes :

- *Comptes Rendus des séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures* ;
- *Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures* ;
- *Sessions des Comités Consultatifs* ;
- *Recueil de Travaux du Bureau International des Poids et Mesures* (Ce Recueil rassemble les articles publiés dans des revues et ouvrages scientifiques et techniques, ainsi que certains travaux publiés sous forme de rapports multicopiés).

La collection des *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (22 tomes publiés de 1881 à 1966) a été arrêtée en 1966 par décision du Comité International.

Le Bureau International publie de temps en temps, sous le titre *Les récents progrès du Système Métrique*, un rapport sur les développements du Système Métrique dans le monde.

Depuis 1965 le journal international *Metrologia*, édité sous les auspices du Comité International des Poids et Mesures, publie des articles sur les principaux travaux de métrologie scientifique effectués dans le monde, sur l'amélioration des méthodes de mesure et des étalons, sur les unités, etc., ainsi que des rapports concernant les activités, les décisions et les recommandations des divers organismes issus de la Convention du Mètre.

Comité International des Poids et Mesures

<i>Secrétaire</i>	<i>Vice-Président</i>	<i>Président</i>
J. DE BOER	J. M. OTERO	L. E. HOWLETT

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

Président

H. BARRELL, Membre honoraire du Comité International des Poids et Mesures, National Physical Laboratory, *Teddington*.

Membres

LABORATOIRES

PHYSIKALISCH - TECHNISCHE BUNDESANSTALT [P.T.B.], *Braunschweig* (G. BECKER, Laboratoriumsleiter).

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

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [N.B.S.], *Boulder* (J. M. RICHARDSON, Chief, Radio Standards Laboratory).

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, Conseiller Scientifique).

LABORATOIRE DE L'HORLOGE ATOMIQUE DU CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE, *Besançon, Bagneux, Orsay* (M. ARDITI, Directeur de Recherches, *Bagneux*).

ISTITUTO ELETTROTECNICO NAZIONALE « GALILEO FERRARIS » [I.E.N.],
Turin (L. FAVELLA, G. ZITO).

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY [N.R.L.M.], *Tokyo*.

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;
C. MENOUD).

INSTITUT DES MESURES PHYSICOTECHNIQUES ET RADIOTECHNIQUES
DE L'U.R.S.S. [I.M.P.R.], *Moscou*.

RADIO RESEARCH LABORATORIES, *Tokyo*.

ORGANISATIONS ET ÉTABLISSEMENTS ASTRONOMIQUES

UNION ASTRONOMIQUE INTERNATIONALE (W. MARKOWITZ et N. STOYKO).

BUREAU INTERNATIONAL DE L'HEURE, *Paris* (B. GUINOT, Directeur).

ASTRONOMISCHES RECHEN-INSTITUT, *Heidelberg* (T. LEDERLE, Astro-
nome).

U. S. NAVAL OBSERVATORY, *Washington D.C.* 20 390 (R. L. DUNCOMBE,
Director, Nautical Almanac Office; K.A. STRAND, Scientific Director;
G. M. WINKLER, Director, Time Service Division).

COMMONWEALTH OBSERVATORY OF AUSTRALIA, *Canberra*.

INSTITUT D'ASTRONOMIE THÉORIQUE, *Leningrad*.

OBSERVATOIRE ASTRONOMIQUE DE TOKYO, *Mitaka*.

NAUTICAL ALMANAC OFFICE, Royal Greenwich Observatory, *Hailsham*
(H. M. SMITH).

INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE MARINA, *San Fernando* (L. QUIJANO,
Chef de Section).

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

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

MEMBRES NOMINATIVEMENT DÉSIGNÉS

J. FUCHS, Directeur de l'Universitätssternwarte, *Innsbrück*.

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

L. RANDIC, Professeur à la Faculté, *Zagreb*.

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

Le représentant du BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
[B.I.P.M.] (J. TERRIEN, Directeur).



ORDRE DU JOUR DE LA SESSION

1. Compte rendu du développement des étalons atomiques de fréquence depuis la 3^e session (1963).
 2. Conditions générales d'un changement de définition de la seconde :
 - a. précision et reproductibilité des étalons atomiques;
 - b. choix de l'étalon pour une définition atomique;
 - c. continuité avec la définition actuelle.
 3. Réponses à la deuxième consultation par correspondance :
 - a. examen des questions soulevées par ces réponses et des suggestions du Comité Consultatif des Unités;
 - b. concepts de la théorie de la relativité et leurs influences sur la rédaction d'une définition atomique de la seconde.
 4. Examen préliminaire de la définition et du maintien d'une échelle atomique de temps fondée sur une définition atomique de la seconde.
 5. Recommandations à formuler.
 6. Questions diverses.
-

COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

4^e SESSION (1967)

RAPPORT

AU

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Par B. DECAUX, Rapporteur

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde a tenu sa quatrième session au Pavillon de Breteuil à Sèvres, les mercredi 12 et jeudi 13 juillet 1967.

Étaient présents : Mr BARRELL, président; MM. ARDITI, BECKER, BONANOMI, DECAUX, DUNCOMBE, ESSEN, FAVELLA, GUINOT, HENDERSON, KARTASCHOFF, LEDERLE, MARKOWITZ, MENOUD, QUIJANO, RANDIC, RICHARDSON, SMITH, STOYKO, STRAND, TARDI, TERRIEN, WINKLER, ZAGAR, ZITO.

MM. HOWLETT, président du Comité International des Poids et Mesures, et DE BOER, secrétaire du Comité International et président du Comité Consultatif des Unités, assistaient à la première séance.

Assistaient également aux séances : MM. GIACOMO et CARRÉ (Bureau International).

Empêché : Deutsches Amt für Messwesen und Warenprüfung, Berlin.

Excusés : National Research Laboratory of Metrology, Tokyo; Radio Research Laboratories, Tokyo; Observatoire Astronomique de Tokyo.

Absents : Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques de l'U.R.S.S., Moscou; Institut d'Astronomie Théorique, Leningrad; Commonwealth Observatory of Australia, Canberra. MM. J. Fuchs, Universitätssternwarte, Innsbruck; J. A. Pierce, Harvard University, Boston.

A l'ouverture de la session, Mr Howlett résume les principales questions que se pose le Comité International et sur lesquelles le Comité Consultatif

devra faire des propositions, en particulier l'opportunité du changement de définition de l'unité de temps du Système International d'Unités. Il souligne que la rédaction d'une définition doit être aussi simple que possible, et recommande que les considérations relativistes soient écartées des discussions.

Le Président rappelle les décisions prises par le Comité Consultatif en 1963, les diverses autres réunions où ces problèmes ont été examinés, et les consultations effectuées par correspondance parmi les membres du Comité Consultatif.

L'Ordre du jour proposé (p. S 10) est adopté.

Le Président salue la mémoire de A. Danjon, ancien président du Comité International des Poids et Mesures et du Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde, décédé le 21 avril 1967.

Mr Decaux est désigné comme rapporteur, assisté de Mr Carré comme secrétaire.

Le premier point de l'Ordre du jour (Compte rendu du développement des étalons atomiques de fréquence depuis la session de 1963) a fait l'objet des Annexes 1 et 2. De la discussion qui s'engage, il ressort que l'existence de nombreux appareils de type commercial permet d'avoir une vue statistique de la précision actuellement garantie, estimée à quelques 10^{-12} pour l'étalon à césium. En conséquence, le Comité Consultatif décide de confirmer le choix du césium 133 comme étalon; cette décision répond ainsi aux points 2a et 2b de l'Ordre du jour (Précision et reproductibilité des étalons atomiques, et choix de l'étalon pour une définition atomique).

En ce qui concerne la continuité avec la définition actuelle (point 2c de l'Ordre du jour), le Comité Consultatif examine divers aspects du problème, en particulier les déterminations récentes du rapport entre la seconde atomique et la seconde des éphémérides (Annexe 3). Il est décidé de conserver, pour la fréquence de la transition du césium, la valeur 9 192 631 770 Hz précédemment choisie.

Les problèmes relativistes soulevés par une définition atomique de l'unité de temps (point 3b de l'Ordre du jour) avaient été mentionnés au cours d'une première consultation par correspondance, et firent l'objet principal d'une deuxième consultation. Cette dernière consultation portait essentiellement sur l'éventualité d'une référence au potentiel gravitationnel existant à la surface du géoïde. Parmi les réponses au questionnaire, une importante partie approuvait cette référence, d'autres réponses exprimaient un avis contraire, et certaines proposaient une référence au temps propre.

Ces problèmes, examinés en séances par le Comité Consultatif, sont résumés dans l'Annexe 4.

La question de la définition et du maintien d'une échelle de temps atomique (point 4 de l'Ordre du jour) a donné lieu à une discussion qui a montré la nécessité d'introduire une recommandation sur ce sujet.

Abordant les recommandations à formuler concernant le changement de définition de la seconde, le Président propose comme base de discussion un projet de déclaration et de définition préalablement établi par Mr Terrien. Il suggère la constitution d'une petite commission, composée de MM. Becker, Bonanomi, Decaux, Winkler, chargée de rédiger un nouveau projet de texte à soumettre au Comité Consultatif. Pour orienter le travail de cette commission, le Comité Consultatif a fait, dans sa deuxième séance du 12 juillet, un premier examen des différents points du premier projet. Il approuve la forme de présentation proposée et donne des directives générales à la commission; le texte de la déclaration devra :

- faire ressortir que la seconde ainsi définie est l'unité de temps du Système International d'Unités;
- reconnaître l'existence de la seconde des éphémérides;
- faire mention du fait que les théories de la relativité n'ont pas été perdues de vue.

Il devra être fait également état de l'utilité de poursuivre les recherches sur les étalons atomiques.

Dans sa troisième séance, le 13 juillet, le Comité Consultatif a examiné les projets de déclaration et de deux recommandations préparés par la commission. Après quelques modifications de détail, ces projets sont adoptés à l'unanimité. (*Déclaration et Recommandations* S 1 et S 2, p. S 14.)

Au cours de la discussion, il est apparu que la nouvelle définition proposée pour l'unité de temps a pour conséquences les problèmes scientifiques suivants :

1^o maintien de la bonne coordination actuelle des émissions de signaux horaires;

2^o mesures à prendre pour le passage progressif et méthodique à la situation dans laquelle la définition atomique de la seconde sera d'un usage beaucoup plus répandu;

3^o étude de l'établissement d'échelles de temps-coordonnée au sens des théories de la relativité.

Une troisième recommandation, tenant compte de ces considérations, est alors proposée; après discussion et mise au point elle est adoptée à l'unanimité (*Recommandation* S 3, p. S 15).

A la fin de la dernière séance, des informations ont été présentées sur les dernières recherches en cours dans certains laboratoires des États-Unis d'Amérique, pour l'amélioration des masers à hydrogène

Avant de clore la session, le Président remercie les membres du Comité Consultatif pour leur travail fructueux. Au nom de ses collègues, Mr Henderson remercie le Président pour son efficace direction des débats.

(20 juillet 1967)

**Déclaration et Recommandations
du Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde
présentées
au Comité International des Poids et Mesures**

DÉCLARATION

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

CONSIDÉRANT

1° que les membres présents à sa 4^e session (juillet 1967) ont exprimé le désir unanime de remplacer la définition actuellement en vigueur de la seconde, unité de temps du Système International d'Unités, par une définition atomique;

2° que la 12^e Conférence Générale des Poids et Mesures (1964), malgré le désir déjà exprimé par le Comité Consultatif en 1963, a estimé qu'il était prématuré de changer la définition de la seconde;

3° que, l'emploi généralisé des étalons de fréquence à césium ne permettant pas d'attendre davantage une déclaration fixant par convention la valeur de la fréquence de la transition utilisée, le Comité International des Poids et Mesures, répondant aux instructions de la 12^e Conférence Générale, a assigné à cette fréquence la valeur 9 192 631 770 hertz et déclaré que cette transition était l'étalon à employer temporairement;

4° que la situation ainsi créée par nécessité n'est pas satisfaisante;

5° que les travaux expérimentaux postérieurs à 1964 ont renforcé la confiance dans les qualités de l'étalon de fréquence à césium et amélioré sa précision;

6° qu'une définition atomique de la seconde peut être formulée d'une façon compatible avec les théories relativistes;

7° que l'adoption d'une définition atomique de la seconde ne peut apporter que des avantages même dans les domaines où d'autres unités, telles que la seconde des éphémérides, doivent être maintenues;

ESTIME que le moment est venu de remplacer la définition de l'unité de temps du Système International d'Unités actuellement en vigueur par une définition atomique fondée sur l'étalon à césium désigné par le Comité International des Poids et Mesures à sa session de 1964.

RECOMMANDATION S 1 (a)

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

RECOMMANDE

1° que la seconde, unité de base du Système International d'Unités, soit définie dans les termes suivants :

« La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 »;

2° que la seconde telle qu'elle fut définie par décision du Comité International des Poids et Mesures à sa session de 1956 soit désignée sous le nom de « seconde des éphémérides ».

RECOMMANDATION S 2 (b)

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

RECOMMANDE que les Organisations et les Laboratoires experts dans le domaine des étalons atomiques de fréquence soient invités à poursuivre les études entreprises pour le perfectionnement de ces étalons.

RECOMMANDATION S 3

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

RECOMMANDE que le Comité International des Poids et Mesures suscite une réunion comprenant des représentants de diverses organisations telles que Bureau International de l'Heure, Union Astronomique Internationale, Union Géodésique et Géophysique Internationale, Union Radioscientifique Internationale, Union Internationale des Télécommunications (Comité Consultatif International des Radiocommunications), pour étudier les problèmes soulevés par l'application des décisions prises concernant la nouvelle définition de l'unité de temps.

(a) Par sa Résolution 1, la 13^e Conférence Générale des Poids et Mesures (octobre 1967) a adopté sans changement la définition proposée au paragraphe 1° de cette Recommandation S 1; elle a abrogé en même temps la Résolution 1 du Comité International (1956) et la Résolution 9 de la 11^e Conférence Générale (1960) qui faisaient de la « seconde des éphémérides » l'unité de temps du SI. La seconde des éphémérides reste en usage en astronomie.

(b) Par sa Résolution 2, la 13^e Conférence Générale des Poids et Mesures (octobre 1967) a formulé une invitation dans le même sens que cette Recommandation S 2.

ANNEXE 1

Travaux sur les étalons atomiques de fréquence

(décembre 1963-décembre 1966)

Depuis la 3^e session (1963) du Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde, les étalons atomiques de fréquence ont été améliorés [A]. L'amélioration des étalons à césium a été générale dans de nombreux laboratoires [B] et elle est relativement plus importante que celle des étalons à hydrogène. Les travaux effectués sur ces derniers [C] n'ont pas été aussi étendus et n'ont pas donné lieu à des publications aussi complètes que pour les travaux effectués sur les étalons à césium.

Les travaux sur les étalons à thallium ont été limités à la Suisse et aux États-Unis [D]; on ne dispose donc pas d'expériences comparatives aussi étendues concernant l'emploi de cet élément.

On admet aujourd'hui que la concordance relative entre les étalons à césium est d'au moins 1×10^{-11} , un ordre de grandeur meilleur qu'en 1963 [E].

Les expériences faites avec des horloges transportables ont montré que les fréquences moyennes d'horloges indépendantes situées dans des laboratoires répartis dans le monde concordent à mieux que 1×10^{-12} [F].

A. Étalons atomiques en général

1. MCCOUBREY (A. O.), *Proc. IEEE*, **54**, 1966, p. 116-135.
2. ZHABOTINSKI (M. E.), Active atomic frequency standards. Progress in Radioscience, U.R.S.I., 1966, part I, p. 28.
3. BONANOMI (J.), Passive atomic frequency standards. *Ibid*, p. 16.
4. ESSEN (L.), STEELE et SUTCLIFFE, The NPL frequency standard, *Proc. 18th Ann. Symp. on Frequency Control*, 1964, p. 308.

B. Quelques étalons à césium particuliers

1. BEEHLER (R. E.), MOCKLER (R. C.) et RICHARDSON (J. M.), *Metrologia*, **1**, 1965, p. 114-131.
2. HOLLOWAY et SANBORN, *Proc. 19th Ann. Symp. Frequency Control*, 1965, p. 344.
3. MUNGALL (A. G.), BAILEY (R.) et DAAMS (H.), *Metrologia*, **2**, 1966, p. 98.

C. *Masers à hydrogène*

1. KLEPPNER *et al.*, *Phys. Rev.*, **138**, 1965, p. A972.
2. VESSOT (R.) *et al.*, *Proc. IEEE*, **54**, 1966, p. 303.
3. VESSOT (R.) *et al.*, *IEEE Trans. on Instrum. and Meas.*, **IM-15**, Dec. 1966, p. 165.
4. RAMSEY (N. F.), The atomic hydrogen maser, *Metrologia*, **1**, 1965, p. 7.

D. *Thallium*

1. BONANOMI (J.), *IRE Trans. on Instrum.*, **I-11**, Dec. 1962, p. 212-223.
2. BEEHLER (R.E.) et GLAZE, *Proc. 17th Ann. Symp. Frequency Control*, 1963, p. 392.

E. *Concordance relative de la fréquence du césium*

1. RICHARDSON (J. M.), Progress in distribution of standard time and frequency 1963 through 1965. Progress in Radioscience, U.R.S.I., 1966, part I, p. 40.
2. BODILY (L. N.), *Hewlett-Packard Journ.*, **16**, April 1965, p. 2.
3. Voir aussi A 1., A 2., B 1., B 3., F 1.
4. MARKOWITZ (W.), Proc. Intern. Conf. on Chronometry, Lausanne 1964, p. 157.

F. *Fréquence moyenne de l'étalon à césium*

1. BODILY (L. N.), HARTKE et HYATT, *Hewlett-Packard Journ.*, **17**, Aug. 1966, p. 13.
 2. BONANOMI (J.) *et al.*, *Proc. IEEE*, **52**, 1964, p. 439.
 3. NICHOLSON (W.) et SADLER (D. H.), *Nature*, **210**, 1966, p. 187.
 4. HUDSON et ATKINSON, The redefinition of the second and the velocity of light, *Physics Today*, May 1963, p. 30.
 5. KOVALEVSKY (J.), Astronomical time, *Metrologia*, **1**, 1965, p. 169.
 6. BECKER (G.), Von der astronomischen zur atomphysikalischen Definition der Sekunde, *PTB Mitteilungen*, 1966, Heft 4, p. 315; Heft 5, p. 415.
 7. BECKER (G.) et FISCHER (B.), Zur Neubestimmung der Länge der Ephemeridensekunde, *PTB Mitteilungen*, 1967, Heft 1, p. 15.
-

ANNEXE 2

Les étalons atomiques de fréquence : état actuel du développement

Par J. BONANOMI

Observatoire de Neuchâtel (Suisse)

I. INTRODUCTION

Le présent article est une discussion des mérites relatifs des différents étalons de fréquence atomiques en vue d'une nouvelle définition de la seconde, basée sur une transition atomique.

Une nouvelle définition de la seconde indiquera forcément la fréquence d'une transition atomique sans spécification de l'appareillage permettant de mesurer cette fréquence. Il est par conséquent important, non seulement d'évaluer avec quelle précision les différents étalons réalisés parviennent à fournir une fréquence stable et reproductible, mais aussi de connaître l'écart de cette fréquence par rapport à la fréquence « idéale », non perturbée.

En pratique et actuellement, seules les transitions entre deux niveaux de structure hyperfine des atomes d'hydrogène et de césium peuvent être envisagées pour la définition de la seconde. Nous pouvons notamment renoncer d'emblée à la description des cellules à rubidium et des masers à ammoniac, et limiter la discussion aux masers à hydrogène et aux résonateurs à césium. Nous mentionnons cependant, pour donner une image complète des solutions techniquement réalisées, les résonateurs à thallium, très semblables aux résonateurs à césium, qui se distinguent toutefois de ces derniers par certains avantages et défauts; il n'a pas été effectué jusqu'ici avec ces résonateurs des travaux suffisants en nombre et en profondeur pour que l'on puisse proposer la fréquence du thallium comme définition de la seconde.

Les caractéristiques communes aux étalons à césium et à hydrogène sont les suivantes. Les deux fréquences de transition sont situées dans le domaine des hyperfréquences. Un jet d'atomes est produit dans un vide poussé; au moyen d'un champ magnétique inhomogène, on enrichit la

population d'un des deux états de structure hyperfine (sélecteur d'état). Le faisceau atomique entre ensuite dans une cavité où un champ hyperfréquence induit des transitions; la résonance est repérée dans le cas du césium par la détection du jet atomique sur du tungstène chaud, tandis que le maser à hydrogène fournit lui-même le signal hyperfréquence. Le fait que le maser à hydrogène est auto-entretenu n'est cependant pas un trait essentiel pour les buts de la définition de la seconde, car il ne contribue qu'à la stabilité à court terme.

En revanche, une différence essentielle entre résonateur à césium et maser à hydrogène, en vue d'une nouvelle définition de la seconde, est donnée par le fait que dans le cas du résonateur à césium les atomes se déplacent tous dans le même sens sans interaction avec les parties mécaniques de l'appareillage, tandis que dans le cas du maser à hydrogène les atomes, retenus dans le « ballon », se déplacent isotropiquement dans tous les sens et subissent une certaine interaction avec les parois du « ballon ». Par conséquent, dans le cas du césium, les perturbations de la fréquence proviennent de l'asymétrie de la structure dans la direction du jet atomique, tandis que dans le cas de l'hydrogène, la perturbation principale est l'effet de paroi.

Enfin, toutes les réalisations techniques comprennent une partie électronique, notamment un oscillateur à quartz qui est asservi à la fréquence de résonance atomique et qui fournit un signal à une fréquence adéquate pour l'utilisateur (généralement 5 MHz).

II. TERMINOLOGIE

Pour exprimer la précision d'une horloge atomique, les termes précision, exactitude, etc. ont été utilisés par différents auteurs avec des significations différentes, créant ainsi quelques confusions. Beehler *et al.* [2] et McCoubrey [1] ont proposé récemment un ensemble de définitions que nous reproduisons ici de façon succincte :

1. *Précision* : Elle n'indique pas une qualité d'un étalon de fréquence, mais se réfère à la mesure entre deux étalons. La précision est donc la limite imposée par les erreurs de mesure.

2. *Stabilité* : Elle indique les variations de fréquence pendant un certain intervalle de temps. On indiquera en général la relation fonctionnelle entre la stabilité et l'intervalle de temps, qui peut varier entre 10^{-4} et 10^8 s. La pureté spectrale donne la même information, mais exprimée en fonction de la fréquence.

3. *Reproductibilité* : C'est la précision avec laquelle la fréquence d'un étalon peut être reproduite après un dérèglage, sans recours à un autre étalon. La *reproductibilité intrinsèque* est la dispersion entre plusieurs étalons de même fabrication, réglés de la même façon, mais sans étalonnage.

4. *Exactitude* : C'est l'écart entre la fréquence d'un étalon et la fréquence attribuée par définition à la transition atomique. Il n'importe en principe pas si cette exactitude est atteinte en ajustant l'étalon au moyen d'un

autre étalon. On parlera d'*exactitude intrinsèque* si cet accord avec la définition est réalisé sans avoir recours à un étalon primaire. Dans ce qui suit, toutefois, lorsque nous parlons d'exactitude tout court, nous entendons par là l'exactitude intrinsèque.

L'exactitude est donc le seul critère de précision essentiel pour les besoins d'une définition de la seconde. En pratique, il se révèle toutefois que les expériences nécessaires pour éprouver l'exactitude exigent aussi une grande stabilité et reproductibilité, de sorte qu'en réalité les quatre critères cités ne sont pas indépendants les uns des autres.

III. LIMITES DE L'EXACTITUDE

Césium. — Il est pratique de considérer séparément l'exactitude du tube à jet seul d'une part et celle de l'horloge complète, quelque peu détériorée par les imperfections de la partie électronique, d'autre part.

Les facteurs limitant l'exactitude du tube seul ont été évalués de façon complète par plusieurs auteurs [2], [3], [6], [7]. Holloway arrive à la conclusion qu'avec les techniques actuelles, il devrait être possible de construire un résonateur ayant une exactitude intrinsèque de $\pm 5 \times 10^{-14}$. Parmi les nombreuses erreurs possibles, la plus difficile à éliminer est celle qui est due aux asymétries de la cavité du type Ramsey. Dans les tubes à jet existants, cette erreur est de loin la plus importante; pour le tube NBS III du National Bureau of Standards, l'incertitude ainsi introduite a été estimée à $\pm 8 \times 10^{-13}$, tandis qu'aucune des autres incertitudes ne dépasse $\pm 1 \times 10^{-13}$. Cette erreur de symétrie n'est pas de nature fondamentale et il y a lieu de croire que sa limite pourra être très considérablement abaissée par des procédés de construction plus soignés, actuellement à l'essai. On peut conclure que la limite imposée à l'exactitude par le tube seul se situe actuellement, pour les différentes versions existantes, légèrement en dessous de $\pm 1 \times 10^{-12}$.

Les erreurs introduites par la partie électronique, quoique un peu moins importantes que celles du résonateur, ne sont pas moins redoutables et sont aussi difficiles à éviter. Parmi les difficultés de la partie électronique, nous citerons en premier lieu les erreurs d'asservissement de l'oscillateur à quartz. La largeur relative de la raie de résonance atomique est typiquement 10^{-8} ; donc, si l'objectif visé est 10^{-13} , le servo-mécanisme doit discriminer la fraction 10^{-5} de la largeur de la raie.

Des erreurs peuvent être introduites tout au long de la boucle d'asservissement: déphasages transitoires mais lents dans la chaîne de multiplication de fréquence, asymétrie de la modulation de fréquence servant à balayer la raie (une distorsion de la 2^e harmonique de 1 pour cent produit déjà une erreur de 10^{-10}), décalage du point zéro de la détection, etc.

Tous ces déplacements apparents de la fréquence de résonance sont proportionnels à la largeur relative de la résonance atomique. A cet égard, les étalons munis de tubes longs, à raie étroite, sont donc favorisés. En pratique, l'expérience a montré que les erreurs de l'électronique des meilleures réalisations se situaient autour de $\pm 7 \times 10^{-13}$.

On peut être confiant que l'inexactitude introduite par l'électronique sera considérablement diminuée dans un proche avenir. En effet, des horloges à césium portables [4], possédant une raie de largeur relative de

6×10^{-8} , accusent une erreur de l'électronique inférieure à 10^{-12} ; puisqu'il existe d'autre part des résonateurs avec une raie au moins 10 fois plus étroite, on en conclut que les techniques actuelles permettent de maintenir les erreurs d'exactitude, dues à l'électronique, inférieures à $\pm 10^{-13}$.

Des étalons à césium de constructions très diverses ont été comparés entre eux depuis bien des années par l'intermédiaire de transmissions d'ondes myriamétriques (VLF); cette méthode a permis de confirmer des concordances à $\pm 10^{-11}$ entre étalons situés dans différents pays. Depuis 1964, c'est-à-dire depuis qu'il existe des étalons de fréquence portables, on a procédé à des comparaisons plus précises entre les étalons nationaux, en transportant un groupe d'étalons portables (2 ou 3) d'un endroit à un autre. D'autres comparaisons encore, entre étalons à césium, ont été obtenues par l'intermédiaire de masers à hydrogène. Citons parmi ces comparaisons celles qui nous semblent mériter le plus de confiance :

Année	Désignation des étalons	Désaccord en 10^{-13}	Référence
1964	NBS III — LSRH	— 7	[8]
1966	5060A — NRC	— 14	[5]
1966	5060A — LSRH	+ 26	[5]
1966	5060A — NBS III	+ 11	[7]

NBS III : National Bureau of Standards, U.S.A. (366 cm)

NRC : National Research Council, Canada (200 cm)

LSRH : Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères (408 cm)

5060A : Hewlett-Packard Co., commercial (12,4 cm)

Nos connaissances sur l'exactitude des étalons à césium peuvent se résumer ainsi :

1° L'exactitude effectivement démontrée entre au moins quatre étalons de constructions très diverses est de l'ordre de $\pm 10^{-12}$.

2° Cette limite sera vraisemblablement repoussée à $\pm 10^{-13}$ dans les réalisations actuellement à l'essai.

Hydrogène. — Tandis que dans le cas du césium la détérioration de l'exactitude par l'électronique n'est pas négligeable, dans le cas du maser à hydrogène l'influence de la détection est nulle et le bilan d'erreur ne contient que les contributions du maser lui-même. D'une discussion récente de ce bilan d'erreur, due à Vessot *et al.* [7], il ressort clairement que la plus grande contribution provient surtout de l'incertitude de l'effet de paroi (« wall shift »). Cet effet est un décalage de la fréquence dû aux collisions des atomes d'hydrogène avec la paroi du ballon en verre de silice. Bien que le mécanisme de la perturbation de fréquence ainsi que l'état de surface ne soient pas encore connus avec certitude, c'est avec des parois enduites de téflon que l'on a obtenu les résultats les plus reproductibles. L'effet de paroi est d'environ 2×10^{-11} pour les ballons utilisés; sa valeur est déterminée en mesurant la fréquence en fonction du diamètre du ballon et en extrapolant au diamètre infini. L'effet de paroi dépend en outre de la température et un coefficient de $1,5 \times 10^{-13}$ par degré a été mesuré pour un ballon donné. Les seules mesures quantitatives disponibles sont dues à Mathur [9] et à Varian Associates [10]. Ces derniers auteurs indiquent

la relation suivante pour l'effet de paroi :

$$\frac{\Delta f}{f} = - 3,71 \times 10^{-10} \times \frac{1}{D} [1 - 5 \times 10^{-3} (t - 40)]$$

où D est le diamètre en cm du ballon et t sa température en degrés Celsius. L'incertitude attribuée par l'auteur aux coefficients conduit, pour un ballon de 174 mm de diamètre et une température de 45 °C, à une incertitude de 2 pour cent de la valeur totale de l'effet de paroi, à savoir $\pm 4 \times 10^{-13}$. Il est évident que l'effet de paroi devra être encore mieux étudié, avant qu'une valeur définitive puisse être attribuée à la fréquence de l'hydrogène.

Il convient de mentionner ici les travaux en cours sous la direction de N. Ramsey à l'Université Harvard. Il s'agit de la construction d'un maser à hydrogène « big box », avec un ballon de retenue environ dix fois plus grand que les ballons actuellement en usage. La majorité des problèmes rencontrés avec les masers, en particulier l'effet de paroi, se trouvent automatiquement réduits d'un facteur 10, et les auteurs se déclarent confiants que cette solution représentera un étalon primaire de fréquence dix fois plus précis que tout ce qui existe actuellement. Cet étalon restera vraisemblablement une exécution unique, étant donné l'extrême difficulté de sa construction et de sa mise au point. Si son exactitude se révèle être aussi bonne que les auteurs le prédisent, la fréquence de l'hydrogène devra alors inévitablement être choisie pour la définition de la seconde, même s'il n'existe qu'un seul laboratoire qui soit en mesure de la réaliser.

Des masers à hydrogène ont été construits en maints endroits; on connaît au moins dix laboratoires, dont sept en Europe, où des masers à hydrogène fonctionnent ou ont fonctionné. Les mesures de fréquence sont toutefois beaucoup moins avancées que pour le césium: entre masers de deux laboratoires différents il n'existe qu'une seule mesure atteignant une précision de l'ordre de 10^{-12} , à savoir celle entre un maser de Harvard et un de Varian Associates [11]. Que les autres laboratoires ne soient pas parvenus, malgré les moyens très considérables mis en œuvre, à atteindre la précision de 10^{-12} , illustre combien la physique et la technologie du maser à hydrogène sont plus difficiles à maîtriser que les problèmes du césium.

Il y a lieu de noter ici que le même groupe (Quantum Electronics Division de Varian avec Hewlett-Packard) qui a commercialisé avec beaucoup de succès des étalons à césium de très haute précision, envisage aussi la construction en série de masers à hydrogène qui seraient d'une manipulation aussi simple que les étalons à césium. Rien ne s'opposera donc, le cas échéant, à une diffusion importante de masers à hydrogène, rendant par là caduque une des principales objections formulées contre l'adoption de la fréquence de l'hydrogène pour la définition de la seconde.

Les mesures les plus précises publiées jusqu'ici sont celles qui ont été effectuées en 1965 au National Bureau of Standards entre deux masers de Varian d'une part, et deux étalons à césium (NBS III et 5060A) d'autre part [7]. L'erreur totale (1σ) attribuée par les auteurs aux masers H-10 utilisés pour ces mesures est de 5×10^{-13} , à comparer à l'erreur de 11×10^{-13} attribuée à l'étalon NBS III; le bilan d'erreur de 5×10^{-13} se compose essentiellement de l'incertitude sur l'effet de paroi. La même série de mesures a fourni la valeur la plus précise jusqu'à ce jour de la

fréquence de l'hydrogène par rapport à celle du césium (9 192 631 770 Hz par définition) :

$$f_H = 1\,420\,405\,751,786\,4 \text{ Hz} \pm 1,2 \times 10^{-12}.$$

Nos connaissances sur l'exactitude des masers à hydrogène peuvent se résumer ainsi :

1° L'exactitude de 10^{-12} a été démontrée. Les expériences et la théorie de l'effet de paroi ne permettent pas de conclure actuellement à une exactitude sensiblement meilleure.

2° Le manque d'expériences étendues entre différents laboratoires constitue une lacune par rapport aux étalons à césium.

IV. LIMITES DE LA REPRODUCTIBILITÉ

Césium. — Pour le césium, on connaît toutes les corrections nécessaires pour obtenir la fréquence « idéale » à partir de la fréquence mesurée; on en déduit que dans le cas du césium les limites de l'exactitude et de la reproductibilité sont les mêmes. C'est aussi ce que l'on constate dans la pratique.

La reproductibilité relative, c'est-à-dire celle qui est obtenue après un dérèglage, est naturellement meilleure (quelques 10^{-13}) mais elle ne constitue pas un critère essentiel pour un étalon primaire.

Hydrogène. — La reproductibilité du maser à hydrogène est meilleure que son exactitude à cause de l'incertitude concernant la théorie et l'expérience de l'effet de paroi. Dans la pratique, on peut préparer des ballons identiques, les enduire d'une couche identique de téflon, faire fonctionner les masers à la même température, utiliser le même procédé d'accord et obtenir ainsi une reproductibilité intrinsèque de $\pm 3 \times 10^{-13}$ (communication privée de D. Kleppner et R. Vessot).

V. STABILITÉ

La stabilité des étalons de fréquence a été l'objet de maintes études, étant donné son importance en vue des applications. A cet égard, le maser à hydrogène est très supérieur aux résonateurs, surtout en stabilité à court terme [7]. Pour le choix d'une nouvelle définition de la seconde, la stabilité n'est toutefois pas une caractéristique essentielle, puisque pour des intervalles de mesure suffisamment longs elle se confond avec la reproductibilité. On peut donc faire abstraction de la stabilité pour autant qu'elle n'impose pas des intervalles de mesure excessivement longs, ce qui empêcherait la mesure des autres critères, à savoir la reproductibilité et l'exactitude. Ce cas extrême n'a pas été encore rencontré dans la pratique.

VI. CONCLUSIONS

La situation se présente donc, très schématiquement, ainsi :

Césium : exactitude $\pm 10^{-12}$, assurée par des expériences étendues;

Hydrogène : exactitude $\pm 10^{-12}$, non corroborée par des expériences indépendantes; reproductibilité intrinsèque $\pm 3 \times 10^{-13}$.

Les deux types d'étalons sont susceptibles d'être sensiblement améliorés.

La question se trouve donc ainsi posée : Pour la définition de la seconde, quelle est la propriété la plus souhaitable : une très bonne reproductibilité intrinsèque (H) ou bien une exactitude quelque peu moins bonne (Cs)? C'est, à notre avis, une question de principe.

(19 avril 1967)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] McCoubrey (A. O.), A survey of atomic frequency standards, *Proc. IEEE*, **54**, 1966, p. 116.
 - [2] Beehler (R. E.), Mockler (R. C.) et Richardson (J. M.), Cesium beam atomic time and frequency standards, *Metrologia*, **1**, 1965, p. 114-131.
 - [3] Holloway (J.H.) et Lacey (R. F.), Factors which limit the accuracy of cesium atomic beam frequency standards. Actes du Congrès International de Chronométrie, Lausanne, 1964, p. 317.
 - [4] Bodily (L. N.), Performance characteristics of a portable cesium beam standard, *Proc. 20th Ann. Symp. on Frequency Control*, 1966.
 - [5] Bodily (L. N.), *Hewlett-Packard Journ.*, Aug. 1966.
 - [6] Harrach (R. J.), Some accuracy limiting effects in an atomic frequency standard, *Proc. 20th Ann. Symp. on Frequency Control*, 1966.
 - [7] Vessot (R.) *et al.*, An intercomparison of hydrogen and cesium frequency standard, *IEEE Trans. on Instr.*, Vol. IM-15, Dec. 1966.
 - [8] Peter (H. E.) et Kartaschoff (P.), Hydrogen maser frequency comparison with Swiss cesium beam standard, *Appl. Phys. Lett.*, **6**, 1965, p. 35.
 - [9] Mathur (B. S.), Thèse, Harvard University (non publiée).
 - [10] Vanier (J.), (à paraître).
 - [11] Vessot (R.) *et al.*, A direct frequency comparison of hydrogen masers in separate laboratories..., *Proc. IEEE*, **54**, 1966, p. 303.
-

ANNEXE 3

L'échelle de temps des éphémérides

Par T. C. Van FLANDERN

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

768 observations de la Lune, effectuées à l'aide de la lunette méridienne de 0,15 m de l'U.S. Naval Observatory et couvrant la période de 1955 à 1966 inclus, ont été réduites en appliquant les corrections de Watts pour les irrégularités du bord lunaire. Ces observations ont alors été comparées à une Éphéméride Lunaire Améliorée corrigée par les termes résultant du nouvel ensemble de constantes astronomiques de l'U.A.I. et par les améliorations apportées par Eckert à la partie principale de la théorie de la Lune de Brown.

Les erreurs résiduelles ont été calculées en supposant que ΔT était exactement égal à A.1 - T.U.2, cette différence étant connue à partir des comparaisons d'une horloge atomique et des mesures avec la lunette zénithale photographique (PZT). Les erreurs résiduelles correspondant à la totalité de la période furent alors analysées pour y rechercher la présence d'une dérive séculaire de ΔT , traduisant une divergence entre les échelles de temps A.1 et T. E. Le résultat a montré une divergence (A.1 - T.E.) de $+ 0,9 \pm 2,2$ s par siècle, ce qui correspond sur la fréquence de transition du césium 133 (9 192 631 770 Hz) à $- 3 \pm 7$ Hz.

Ce résultat peut être comparé favorablement à celui de Sadler et Nicholson (*Nature*, **210**, 1966, p. 187): $- 11 \pm 5$, bien que ce dernier n'inclue pas les corrections d'Eckert (sauf le terme 182). Ces deux résultats diffèrent nettement des conclusions antérieures, qui tendaient généralement à placer la divergence plus près de $- 10$ s par siècle. On attribue principalement la raison de cet écart au terme $- 0,189'' \sin \Omega$ introduit dans la longitude de la Lune, en conformité avec les changements dans les constantes de l'U.A.I.

Durant la période 1954,0-1958,5, lorsque la valeur de ... 770 Hz fut primitivement déterminée, ce terme variait lentement ayant atteint un

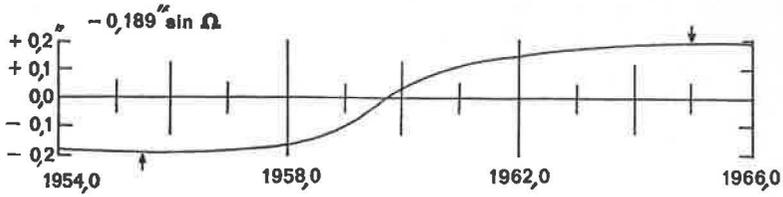


Fig. 1.

minimum vers 1955,5 (*fig. 1*). Entre 1955 et 1963, période couverte par la plupart des autres analyses, ce terme est passé de $- 0,19''$ à $+ 0,17''$, ce qui implique grossièrement une dérive de 10 s par siècle.

(Juillet 1967)

ANNEXE 4

La nouvelle définition de la seconde et les théories relativistes

Par G. BECKER

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Allemagne)

Selon la théorie de la relativité généralisée, un photon d'énergie $E = h \cdot f$ (h , constante de Planck; f , fréquence) se mouvant dans un champ gravitationnel d'un endroit où le potentiel gravitationnel est Φ_A à un endroit où le potentiel gravitationnel est Φ_B va gagner ou perdre une énergie ΔE proportionnelle à la différence entre Φ_A et Φ_B . En conséquence la fréquence du photon changera. Selon une autre description équivalente, la fréquence d'un atome dépend immédiatement du potentiel gravitationnel à l'endroit de l'atome. La même dépendance, évidemment, est valable pour toutes les fréquences naturelles existantes.

A la surface de la Terre on trouverait un changement relatif de la fréquence d'environ $1,1 \times 10^{-15}$ par mètre en fonction de la hauteur. Par l'effet de Mössbauer cette valeur est déjà bien prouvée [1]. Les différences relatives des fréquences des atomes qui se trouvent aux différents endroits dans le système solaire devraient atteindre l'ordre de 10^{-8} , ou même plus.

Quoique, à présent, on n'ait pas démontré par l'expérience que la fréquence d'une horloge atomique dépend du potentiel gravitationnel, on ne doute pas de cet effet. La stabilité de la fréquence des horloges atomiques, aujourd'hui déjà presque suffisante pour étudier l'effet mentionné, sera certainement améliorée dans le futur; inévitablement, il deviendra nécessaire de tenir compte du potentiel gravitationnel à l'endroit de l'atome. C'est pourquoi il faut formuler la définition de la seconde d'une façon compatible avec les théories relativistes.

Il y a, en principe, deux possibilités de définir la seconde par une transition atomique :

1° On définit la seconde comme la durée d'un certain nombre n de périodes d'une transition atomique. La seconde, que l'on définit de telle manière, en utilisant la terminologie des théories relativistes, s'appelle la seconde du « temps propre » de l'atome.

2° On définit la seconde comme la durée de n périodes d'une transition atomique en spécifiant que l'atome se trouve à un certain potentiel gravi-

tationnel de référence qu'il faut fixer. Pour un endroit où le potentiel gravitationnel est différent, on attribue à l'atome une fréquence différente, de façon à compenser l'effet de la différence du potentiel par rapport au potentiel de référence. C'est la seconde d'un « temps-coordonnée » que l'on définit de telle manière.

La seconde de temps propre est l'unité adéquate pour les mesures de fréquences ou d'intervalles de temps dans les systèmes de coordonnées qui ne diffèrent du système de l'atome ni en vitesse, ni en potentiel gravitationnel. Sous ces conditions *les résultats de mesure ne dépendent pas des valeurs des potentiels gravitationnels*. C'est pourquoi *seule la première possibilité est qualifiée pour la nouvelle définition de la seconde comme unité de base du Système International d'Unités*.

La question se pose s'il est nécessaire de se référer, dans la définition de la seconde, aux atomes « au repos » pour exclure l'influence de l'effet Doppler de premier ordre et de deuxième ordre. A cet égard, il faut considérer que c'est *l'atome qui est l'étalon*, et non l'appareil (horloge atomique) avec lequel on cherche à reproduire la fréquence de l'atome. Il s'agit donc, en principe, de transmettre des intervalles de temps — donnés par les périodes de l'atome — du système de l'atome au système du laboratoire. Au cas où les deux systèmes seraient différents en vitesse ou en potentiel gravitationnel, il est pour les physiciens tout naturel d'appliquer les lois physiques (c'est-à-dire les théories relativistes) sans qu'il soit nécessaire de le prescrire dans le texte de la définition de la seconde.

Si l'on désire installer une échelle de temps atomique pour les besoins métrologiques à la surface de la Terre, une telle échelle aurait nécessairement le caractère d'un temps-coordonnée. C'est une *tâche future* d'introduire une telle échelle que l'on pourrait nommer « Temps Terrestre » TT.

L'unité de cette échelle serait définie selon la deuxième possibilité discutée. Il serait raisonnable de choisir comme potentiel gravitationnel de référence celui de la surface du géoïde et de se référer à l'atome au repos relatif à la surface du géoïde.

Les deux possibilités d'une définition sont donc importantes du point de vue métrologique. Pour les besoins astronomiques, un temps-coordonnée se référant au potentiel gravitationnel zéro (en ne considérant que le potentiel créé par les masses du système solaire) semble être le mieux approprié [2], [3], [4]. La désignation de ce temps pourrait être « Temps Céleste » TC. La différence entre les unités du TT et du TC changera en fonction du temps, car le potentiel gravitationnel à la surface de la Terre varie par suite des variations des distances entre la Terre et les corps célestes du système solaire.

Ces problèmes ont été discutés plus en détail dans [3], [4].

(Juillet 1967)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] POUND (R. V.) et SNIDER (R. L.), *Phys. Rev.*, **140 B** (2), 1965, p. 758.
- [2] AOKI (S.), *Asir. J.*, **69**, 1964, p. 221.
- [3] BECKER (G.), FISCHER (B.), KRAMER (G.) et MÜLLER (E. K.), *PTB-Mitt.*, **77**, 1967, p. 111.
- [4] BECKER (G.) et KRAMER (G.), *PTB-Mitt.*, **77**, 1967 (sous presse).

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE 4^e Session (1967)

	Pages
	S
Avertissement historique	5
Liste des Membres	7
Ordre du jour	10
Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par B. Decaux	11
Examen du développement des étalons atomiques de fréquence; discussion en vue de l'adoption d'une nouvelle définition de la seconde fondée sur un étalon atomique; problèmes d'application soulevés par un changement de définition.....	12
Déclaration et Recommandations présentées au Comité International des Poids et Mesures :	
<i>Déclaration</i> estimant que le moment est venu d'adopter une définition atomique de l'unité de temps du SI, fondée sur l'étalon à césium	14
<i>Recommandation S 1</i> (Définition atomique proposée pour l'unité de temps du SI).....	15
<i>Recommandation S 2</i> (Invitation aux laboratoires à poursuivre leurs études) ...	15
<i>Recommandation S 3</i> (Nécessité de l'étude par les organisations intéressées des problèmes d'application soulevés par une nouvelle définition de la seconde).....	15
Annexes	
1. <i>Travaux sur les étalons atomiques de fréquence</i> (Bibliographie décembre 1963-décembre 1966)	16
2. Observatoire de Neuchâtel (Suisse). — <i>Les étalons atomiques de fréquence: état actuel du développement</i> , par J. Bonanomi	18
3. U.S. Naval Observatory. — <i>L'échelle de temps des éphémérides</i> , par T.C. Van Flandern	25
4. P.T.B. (Allemagne). — <i>La nouvelle définition de la seconde et les théories relativistes</i> , par G. Becker.....	27

IMPRIMERIE DURAND

28-LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1968, n° 700

Dépôt légal, Éditeur, 1968, n° 2

ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 5-8-1968

Imprimé en France

