

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE
SESSION DE 1974

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

COMITÉ CONSULTATIF

POUR

LA DÉFINITION DE LA SECONDE

7^e SESSION — 1974

(9-11 juillet)



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Pavillon de Breteuil, F-92310 SÈVRES, France

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

NOTICE HISTORIQUE

Les organes de la Convention du Mètre

Le Bureau International, le Comité International et la Conférence Générale des Poids et Mesures

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

Le Bureau International a son siège près de Paris, dans le domaine (43 520 m²) du Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) mis à sa disposition par le Gouvernement français; son entretien est assuré à frais communs par les États membres de la Convention du Mètre (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 du *Comité International des Poids et Mesures* (C.I.P.M.), placé lui-même sous l'autorité de la *Conférence Générale des Poids et Mesures* (C.G.P.M.).

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

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

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

Limitées à l'origine aux mesures de longueur et de masse et aux études métrologiques en relation avec ces grandeurs, les activités du Bureau International ont été étendues aux étalons de mesure électriques (1927), photométriques (1937) et des rayonnements ionisants (1960). Dans ce but, un agrandissement des premiers laboratoires construits en 1876-1878 a eu lieu en 1929 et deux nouveaux bâtiments ont été construits en 1963-1964 pour les laboratoires de la Section des rayonnements ionisants.

Une trentaine de physiciens ou techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau International; ils font des recherches métrologiques ainsi que des mesures dont les résultats sont consignés dans des certificats portant sur des étalons des grandeurs ci-dessus. Le budget annuel du Bureau International est de l'ordre de 4 000 000 de francs-or, soit environ 1 600 000 dollars U.S.

(1) Au 31 décembre 1974, quarante-trois États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne (Rép. Fédérale d'), Allemande (Rép. Démocratique), Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, Canada, Chili, Corée, Danemark, Dominicaine (Rép.), Égypte, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Irlande, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Venezuela, Yougoslavie.

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

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

1. Le *Comité Consultatif d'Électricité* (C.C.E.), créé en 1927.
2. Le *Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie* (C.C.P.R.), nouveau nom donné en 1971 au *Comité Consultatif de Photométrie* (C.C.P.) créé en 1933 (de 1930 à 1933 le Comité précédent (C.C.E.) s'est occupé des questions de photométrie).
3. Le *Comité Consultatif de Thermométrie* (C.C.T.), créé en 1937.
4. Le *Comité Consultatif pour la Définition du Mètre* (C.C.D.M.), créé en 1952.
5. Le *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde* (C.C.D.S.), créé en 1956.
6. Le *Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants* (C.C.E.M.R.I.), créé en 1958. Depuis 1969 ce Comité Consultatif est constitué de quatre sections: Section I (Rayons X et γ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie α).
7. Le *Comité Consultatif des Unités* (C.C.U.), créé en 1964.

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

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

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

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

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

Comité International des Poids et Mesures

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

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

Président

J. V. DUNWORTH, Directeur du National Physical Laboratory, *Teddington*.

Membres

AMT FÜR STANDARDISIERUNG, MESSWESEN UND WARENPRÜFUNG
[A.S.M.W.], *Berlin*.

BUREAU INTERNATIONAL DE L'HEURE [B.I.H.], *Paris*.

BUREAU DES LONGITUDES, *Paris*.

COMITÉ CONSULTATIF INTERNATIONAL DES RADIOCOMMUNICATIONS
[C.C.I.R.] de l'Union Internationale des Télécommunications, *Genève*.

COMMISSION NATIONALE DE L'HEURE [C.N.H.], *Paris*.

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES [N.R.C.], *Ottawa*.

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

ISTITUTO ELETTROTECNICO NAZIONALE GALILEO FERRARIS [I.E.N.],
Turin.

LABORATOIRE DE L'HORLOGE ATOMIQUE DU CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE, *Orsay (France)*.

LABORATOIRE SUISSE DE RECHERCHES HORLOGÈRES [L.S.R.H.], *Neuchâtel*.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [N.B.S.], *Boulder*.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [N.P.L.], *Teddington* (Grande-Bretagne).

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

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [P.T.B.], *Braunschweig*.

RADIO RESEARCH LABORATORIES [R.R.L.], *Tokyo*.

ROYAL GREENWICH OBSERVATORY [R.G.O.], *Hailsham*.

UNION ASTRONOMIQUE INTERNATIONALE [U.A.I.].

U.S. COAST GUARD [U.S.C.G.], *Washington*.

U.S. NAVAL OBSERVATORY [U.S.N.O.], *Washington*.

J. BONANOMI, Observatoire de Neuchâtel, *Neuchâtel*.

A. ORTE, Instituto y Observatorio de Marina, *San Fernando* (Espagne).

Le directeur du Bureau International des Poids et Mesures [B.I.P.M.],
Sèvres.

ORDRE DU JOUR DE LA SESSION

1. Progrès des étalons atomiques de fréquence et des horloges atomiques.
 2. L'échelle de Temps Atomique International TAI.
 3. Les méthodes de comparaison de temps aux distances intercontinentales.
 4. Exactitude de l'intervalle unitaire d'une seconde du TAI.
 5. Rapport du Groupe de travail chargé d'examiner les conséquences de la Recommandation S 2 (1972).
 6. Information sur l'élargissement des tolérances de l'UTC, adopté par le Groupe d'Étude 7 du C.C.I.R.
 7. Informations sur la valeur de la vitesse de la lumière.
 8. Questions diverses.
-

COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

7^e SESSION (1974)

RAPPORT

AU

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Par B. GUINOT, Rapporteur

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (C.C.D.S.) a tenu sa 7^e session au Bureau International des Poids et Mesures, à Sèvres, au cours de six séances, les mardi 9, mercredi 10 et jeudi 11 juillet 1974.

Étaient présents :

J. V. DUNWORTH, vice-président du C.I.P.M., président du C.C.D.S.

Les délégués des laboratoires et organisations membres :

Bureau International de l'Heure [B.I.H.], Paris (B. GUINOT).

Bureau des Longitudes, Paris (J. KOVALEVSKY).

Comité Consultatif International des Radiocommunications
[C.C.I.R.] de l'Union Internationale des Télécommunications,
Genève (Ch. STETTLER).

Commission Nationale de l'Heure [C.N.H.], Paris (B. GUINOT).

Conseil National de Recherches [N.R.C.], Ottawa (C. C. COSTAIN).

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris [I.E.N.],
Turin (S. LESCHIUTTA).

Laboratoire de l'Horloge Atomique du C.N.R.S., Université de
Paris-Sud, Orsay (C. AUDOIN).

Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères [L.S.R.H.], Neu-
châtel (Ch. MENOUD).

National Bureau of Standards [N.B.S.], Boulder (J. A. BARNES).

National Physical Laboratory [N.P.L.], Teddington (A. E. BAI-
LEY, J. McA. STEELE).

National Research Laboratory of Metrology [N.R.L.M.], Tokyo
(Y. KOGA).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [P.T.B.], Braunschweig
(G. BECKER).

Radio Research Laboratories [R.R.L.], Tokyo (Y. SABURI).

Royal Greenwich Observatory [R.G.O.], Hailsham (H. M.
SMITH).

Union Astronomique Internationale [U.A.I.], (W. MARKOWITZ).

U.S. Naval Observatory [U.S.N.O.], Washington (G. M. R. WIN-
KLER).

Les membres nominativement désignés :

J. BONANOMI, directeur de l'Observatoire de Neuchâtel.

A. ORTE, sous-directeur de l'Instituto y Observatorio de Marina,
San Fernando.

Le directeur du B.I.P.M. (J. TERRIEN).

Assistaient aussi à la session : P. VIGOUREUX (N.P.L.), P. GIACOMO,
sous-directeur du B.I.P.M., P. CARRÉ (B.I.P.M.) et M. GRAN-
VEAUD (B.I.H.).

Excusé : U.S. Coast Guard, Washington.

Absents : Amt für Standardisierung, Messwesen und Waren-
prüfung, Berlin; Institut des Mesures Physicotechniques et
Radiotechniques de l'U.R.S.S., Moscou.

Après les souhaits de bienvenue de Mr *Terrien* et du *Président*, la
séance est ouverte.

Le *Président* exprime sa satisfaction au sujet du Temps Atomique
International, TAI. Le TAI, adopté en octobre 1971 par la 14^e Confé-
rence Générale des Poids et Mesures, a reçu une acceptation internatio-
nale. Il reste quelques détails à fixer par le C.C.D.S., détails qui pourraient
être entérinés par le C.I.P.M. et la C.G.P.M. en mai 1975. De même,
il n'y a pas lieu d'avoir des discussions de principe sur le Temps Universel
Coordonné UTC défini par le Comité Consultatif International des
Radiocommunications (C.C.I.R.), mais il convient de prendre une déci-
sion pour le recommander éventuellement comme base des temps légaux.
Le C.C.D.S. aura aussi à donner ses conclusions sur les désignations des
échelles de temps TAI et UTC. Le *Président* souhaite de larges échanges
de vue, afin d'éviter toute décision hâtive.

Avec l'approbation du Comité Consultatif, le *Président* confie la
tâche de rapporteur à Mr Guinot. Mr Vigoureux accepte de faire les
traductions françaises et anglaises quand elles seront nécessaires.

1. Progrès des étalons atomiques de fréquence et des horloges atomiques

Mr *Audoin* présente les travaux accomplis au Laboratoire de l'Hor-
loge Atomique (Orsay). Une méthode très directe pour mesurer le dépla-
cement de fréquence des étalons à jet de césium, dû à l'effet Doppler

du second ordre, a été proposée; elle a été essayée avec succès en collaboration avec le Conseil National de Recherches à Ottawa. Des masers à hydrogène ont été construits et un système d'accord automatique de la cavité résonnante a été réalisé. Le laboratoire a aussi étudié les lasers à hélium-néon asservis sur une raie d'absorption saturée de l'iode ou du méthane.

Mr *Saburi* donne un compte rendu des travaux sur l'amélioration des masers à hydrogène par les Radio Research Laboratories (Tokyo) et sur l'étalon à jet de césium construit en 1971 par le National Research Laboratory of Metrology (Tokyo). Ce dernier instrument est en cours de transformation pour en faire un étalon primaire de fréquence; il a une cavité de 2,4 m et il est possible de renverser la direction du jet. Des déterminations absolues de la seconde sont attendues dans le courant de 1975. Mr *Saburi* regrette que les horloges à césium japonaises, bien comparées entre elles, ne puissent être bien reliées à celles qui participent à la formation du TAI et souhaite que des moyens de comparaison par satellites, par radiointerférométrie ou autres soient mis en œuvre.

Mr *Becker* donne une estimation de l'incertitude de la fréquence de l'étalon à jet de césium CS1 de la Physikalisch-Technische Bundesanstalt : $\pm 1,5 \times 10^{-13}$ en valeur relative. Le décalage de la fréquence dû à la cavité est déterminé par renversement du jet et par l'utilisation de deux vitesses des atomes; les résultats des deux méthodes sont en accord. L'étalon à césium CS2 est en préparation. La P.T.B. dispose de deux masers à hydrogène dont l'un a été modifié afin qu'il puisse contribuer à la formation de l'échelle TAI. Les lasers à hélium-néon stabilisés par le méthane ont été aussi étudiés, mais Mr *Becker* ne pense pas que ces lasers puissent conduire à des étalons de fréquence supérieurs aux étalons à césium.

Mr *Winkler* fait part de l'expérience acquise à l'U.S. Naval Observatory (Washington) sur les nouvelles horloges à césium commerciales Hewlett-Packard 5061 A, Option 004, dont il exploite 17 exemplaires. Lorsque ces horloges sont neuves, leur stabilité en fréquence pour des temps d'échantillonnage inférieurs à cinq jours est bien supérieure à celle des horloges à césium ordinaires. Toutefois leur stabilité se dégrade progressivement. A une question de Mr *Saburi*, Mr *Winkler* répond qu'il peut y avoir une dérive de fréquence car la fréquence est issue de deux faisceaux qui n'ont pas strictement les mêmes propriétés et dont l'importance relative varie peu à peu; le constructeur espère remédier à ce défaut.

Mr *Winkler* signale que la Société Hewlett-Packard produit désormais de petites horloges à césium dont les qualités semblent avoisiner celles des horloges ordinaires. Il ne pense pas, cependant, qu'elles puissent être utilisées dans la formation d'échelles de temps.

Mr *Barnes* présente les étalons de fréquence du National Bureau of Standards. L'étalon à jet de césium NBS-4 a été employé depuis août 1973; l'étalon NBS-5 depuis janvier 1973. Les défauts d'exactitude

sont estimés respectivement à $\pm 3 \times 10^{-13}$ et $\pm 2 \times 10^{-13}$, en valeur relative. Les fréquences de ces deux étalons s'accordent à 2×10^{-13} près; dans les mêmes limites, elles s'accordent à celles de la P.T.B. et du N.R.C. (après correction de $1,8 \times 10^{-13}$ pour le décalage gravitationnel). NBS-5 est en cours d'amélioration afin d'accroître la stabilité et de permettre un fonctionnement continu.

Le N.B.S. étudie un étalon passif à hydrogène. Il poursuit ses travaux sur les lasers stabilisés et la synthèse des fréquences vers l'infrarouge. On est parvenu à résoudre la structure hyperfine de la raie du méthane utilisée pour stabiliser les lasers à hélium-néon, ce qui pourra conduire à une amélioration de la qualité des fréquences dans l'infrarouge.

Mr *Steele* espère que le nouvel étalon à jet de césium NPL III du National Physical Laboratory (Teddington) pourra fonctionner dans quelques mois et fournir une mesure de la seconde vers le milieu de 1975. Le défaut d'exactitude prévu est de ± 2 ou 3×10^{-13} . La longueur d'interaction est 93 cm. Des recherches sont poursuivies pour assurer l'égalité de phase dans les champs séparés pour l'excitation de Ramsey sans exiger des tolérances mécaniques trop étroites.

Deux masers à hydrogène sont employés pour les travaux à court terme. L'un d'eux sert à étudier la corrélation de l'effet de paroi avec les propriétés physiques des revêtements.

Mr *Costain* rappelle que l'étalon à jet de césium Cs III du Conseil National de Recherches (Ottawa) est à la base du TA (NRC) : les horloges à césium commerciales sont étalonnées deux fois par semaine sur les durées de 6 heures. Le nouvel étalon Cs V, ayant une longueur d'interaction de 2,1 m, a commencé à fonctionner en 1973, avec un défaut d'exactitude estimé de ± 1 à 2×10^{-13} . Son amélioration en cours devrait permettre d'éliminer les dérives de fréquence associées au niveau de puissance d'excitation et de le laisser en fonctionnement continu. Une nouvelle méthode a été conçue pour déterminer le décalage en fréquence dû à l'effet Doppler du second ordre; elle fait appel à la transformée de Fourier de la figure de Ramsey.

Les deux masers à hydrogène du N.R.C. font l'objet de recherches destinées à améliorer leur stabilité à long terme.

Mr *Leschiutta* fait état des recherches en cours à l'I.E.N. et à l'Université de Pise pour utiliser une structure fine du magnésium comme base d'une fréquence étalon. Ce jet atomique a été expérimenté avec succès et l'on tente de détecter la résonance.

Mr *Menoud* expose les recherches sur le maser à hydrogène faites au Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères. A la place des couches de téflon obtenues par dispersion, on a essayé un dépôt chimique pour diminuer l'effet de paroi. Avec des couches de $0,1 \mu\text{m}$, on a obtenu de bonnes conditions d'oscillation avec un effet de paroi du même ordre de grandeur que pour les couches de $0,05 \mu\text{m}$ obtenues par dispersion.

D'autre part, une étude complète du sélecteur d'état, faite à l'aide d'un ordinateur, permet d'espérer une amélioration. Les sélecteurs à quatre pôles et à six pôles conduisent à des résultats comparables.

Au sujet de l'effet de paroi, Mr *Audoin* précise qu'il désire opérer à la température où celui-ci disparaît.

Dans la discussion qui suit, Mr *Barnes* fait remarquer que les étalons à jet de césium approchent sans doute de leur limite d'exactitude, mais il ne se présente pas de dispositif supérieur. Pour cette raison, Mr *Costain* dit qu'il faut continuer à faire porter des efforts sur les étalons à césium. Mr *Winkler* souligne cependant l'intérêt de l'étude d'autres étalons et tout particulièrement de l'étude faite en Italie; il attire l'attention sur les estimations de Mr *Hellwig* selon lesquelles il est très probable que l'exactitude de $\pm 5 \times 10^{-14}$ puisse être atteinte par les étalons micro-ondes à jets; la même exactitude pourrait être atteinte par les lasers stabilisés, mais avec une probabilité moindre, tandis que les jets submillimétriques pourraient conduire à une exactitude de $\pm 1 \times 10^{-14}$.

2. L'échelle de Temps Atomique International (TAI)

Mr *Guinot* rappelle qu'à la 6^e session du C.C.D.S., il avait proposé d'établir le TAI à partir des données des horloges atomiques prises individuellement, dans le but d'améliorer sa stabilité à long terme. Une méthode de calcul a été élaborée et les essais ont porté sur les données de 1972 et de la première moitié de 1973. En juillet 1973, la nouvelle méthode de calcul (nommée ALGOS) a été mise en application. Elle est décrite dans le Rapport Annuel du B.I.H. pour 1973.

Les résultats sont obtenus tous les deux mois sous la forme de corrections, données tous les 10 jours, aux échelles de temps locales. Cependant, afin de conserver le rythme mensuel de publication, le B.I.H. a été conduit à faire une réduction mensuelle provisoire. L'écart entre les résultats définitifs et provisoires n'excède généralement pas 10 ns et n'a aucune conséquence pratique. Les établissements participants reçoivent tous les deux mois des tables donnant les corrections de marche appliquées aux horloges ainsi que les poids. Ces quantités seront publiées dans les Rapports Annuels du B.I.H.

Mr *Guinot* ajoute quelques commentaires :

— Les horloges utilisées sont toutes des horloges à césium commerciales. Leur nombre est de 55 à 60. Une dizaine d'horloges appartiennent à des laboratoires qui n'établissent pas un temps local indépendant; dans l'ancienne méthode de calcul, ces horloges n'auraient pas été utilisées. Il est toutefois regrettable que seules puissent être utilisées les horloges d'Amérique du Nord et d'Europe par suite de l'absence de liens horaires suffisants avec les autres continents. En particulier l'important ensemble d'horloges japonaises ne peut pas être utilisé.

— Les horloges à césium améliorées (Hewlett-Packard 5061 A, Option 004) ne paraissent pas bénéficier d'une stabilité à très long terme supérieure à celle des horloges normales. De ce fait, on ne leur a pas apporté de traitement statistique particulier. On note aussi que l'incertitude de l'exactitude est la même pour ces horloges que pour les autres et que certaines d'entre elles ont montré d'importantes dérives de fréquence.

— Les transports d'horloges ont révélé que les temps de propagation apparents des signaux de LORAN-C avaient un peu varié et qu'il existait entre les résultats publiés tous les 10 jours, basés sur le lien par LORAN-C, des incohérences atteignant $1 \mu\text{s}$. Un réajustement général des temps de propagation a été effectué en janvier 1974. Afin de permettre des comparaisons, le calcul par l'ancienne méthode qui consistait en une moyenne de sept échelles locales indépendantes de temps atomique a été poursuivi. On a fait arbitrairement coïncider en phase et fréquence les deux séries de résultats durant l'intervalle 1973 avril 27 - 1973 juin 26 afin d'assurer la continuité du TAI lors du changement de méthode de calcul. Du début de 1972 au début de 1974, les différences n'ont jamais excédé $\pm 1,5 \mu\text{s}$.

— Une étude comparative des horloges à césium commerciales neuves et anciennes, faite par Mr Granveaud, a montré que la fréquence des horloges décroît, la décroissance étant plus rapide pour les horloges neuves. Il en résulte que la fréquence du TAI décroît de $1 \text{ à } 2 \times 10^{-13}$ par an, résultat conforme à ceux qui ont été trouvés à la P.T.B. et au N.B.S. à l'aide des étalons primaires.

A cause des limitations par les erreurs non aléatoires des horloges et par les variations dues au mode de comparaison de temps, Mr *Guinol* ne pense pas que l'on puisse améliorer substantiellement la stabilité du TAI par l'usage d'un nombre accru d'horloges à césium commerciales des modèles existants ou par des algorithmes plus élaborés. Le recours aux étalons primaires construits par les laboratoires apporterait des gains non seulement en exactitude, mais aussi en stabilité comme il se propose de le montrer ultérieurement.

En réponse à des questions posées par MM. *Winkler*, *Barnes* et *Bailey*, Mr *Guinol* précise que les étalons primaires du N.B.S. et du N.R.C. n'entrent pas dans le TAI bien qu'ils soient utilisés pour les échelles de temps de ces établissements. Les dérives dans la propagation apparente du LORAN-C semblent progressives; on a observé des fluctuations de $\pm 0,2 \mu\text{s}$ dans la liaison transatlantique, mais sans périodicité bien définie. Le filtre rectangulaire appliqué à la prévision de marche des horloges permet un rejet des horloges fautives plus aisé que le filtre exponentiel suggéré par Mr *Barnes*.

Mr *Becker* a formé la moyenne des fréquences des échelles de temps de F. (France), O.N. (Observatoire de Neuchâtel), N.B.S., P.T.B. et R.G.O. et l'a comparée à la fréquence de l'échelle de l'U.S.N.O. pour le

milieu de 1970 et aussi pour le milieu de 1973. Le résultat fut que les fréquences des deux groupes, qui comprenaient approximativement le même nombre d'horloges commerciales, ont divergé de $6,1 \times 10^{-13}$ en trois ans, ce qui donne l'ordre de grandeur de la stabilité que l'on peut attendre des ensembles d'horloges commerciales.

Mr *Barnes* demande s'il est possible d'introduire des horloges autres que les horloges à césium dans l'algorithme du B.I.H. Mr *Guinot* répond qu'il est prévu de le faire, mais qu'on ne lui a pas encore communiqué de données. Mr *Barnes* estime qu'on devrait envoyer au B.I.H. les données des horloges de grande stabilité de tous types, afin qu'on puisse étudier leurs résultats, même si elles reçoivent un poids nul dans la formation du TAI et propose que l'on rédige une recommandation en ce sens (*Recommandation S 5* (1974), p. S 17).

3. Les méthodes de comparaison de temps aux distances intercontinentales

Plusieurs auteurs ont signalé des dérives de quelques dixièmes de microseconde dans les comparaisons de temps par LORAN-C. Au N.R.C., on pense que ces dérives ont même atteint $3 \mu\text{s}$, à cause de réflexions sur des immeubles en construction.

En réponse à ces remarques, Mr *Winkler* expose les précautions à prendre dans l'utilisation du LORAN-C qui restera courante sans doute pendant longtemps.

Il faut tout d'abord éviter les interférences locales avec d'autres émissions. Ces interférences sont d'autant plus redoutables que, grâce à la large diffusion des générateurs de fréquence très stables, elles sont cohérentes. Il convient donc d'utiliser des filtres. Il faut faire attention aux interférences des diverses chaînes de LORAN-C entre elles. Les antennes de réception doivent rester fixes; des déplacements minimes peuvent donner lieu à des variations des durées de propagation beaucoup plus grandes que celles qui correspondent au changement de distance depuis l'émetteur. L'échauffement des antennes exposées au soleil apporte des variations de $0,1$ à $0,2 \mu\text{s}$. Il faut aussi contrôler la stabilité des retards apportés par les récepteurs; Mr *Winkler* peut envisager d'organiser une tournée de contrôle à l'aide d'un appareil d'étalonnage. Quand toutes les précautions mentionnées sont prises, on n'observe pas de dérive dans les comparaisons de temps, lorsqu'on reçoit les émissions d'une même chaîne.

Pour assurer la liaison transatlantique, des comparaisons entre chaînes doivent être faites dans les stations de Cape Race et Ejde. Elles introduisent des incertitudes qui peuvent expliquer la dérive de $1 \mu\text{s}$ signalée par le B.I.H. Pour y remédier il faudrait faire des contrôles hebdomadaires par une méthode indépendante.

Les comparaisons de temps par transport d'horloge resteront une

nécessité, car elles réalisent une méthode absolue; leur précision atteint maintenant $0,1 \mu\text{s}$ et leur couverture est mondiale, mais on ne peut pas envisager d'en accroître le nombre. Les liaisons par satellites permettent aussi une précision de $0,1 \mu\text{s}$; elles sont utilisées entre les États-Unis et le Japon, mais elles souffrent encore de nombreuses pannes. On espère néanmoins assurer prochainement une liaison hebdomadaire. Un lien identique avec l'Europe est possible.

Mr *Barnes* souligne l'intérêt de méthodes de vérification du LORAN-C. Mr *Steele* rappelle les possibilités de la radiointerférométrie à très longue base: précision de 50 à 100 ns actuellement.

En conclusion à ces échanges de vues, la *Recommandation S 3* (1974), p. S 16, est rédigée.

4. Exactitude de l'intervalle unitaire d'une seconde du TAI

La durée de l'intervalle unitaire du TAI a été mesurée à l'aide des étalons à césium primaires de la P.T.B., du N.B.S. et du N.R.C. En 1973, les résultats s'accordent à environ 1×10^{-13} près (compte tenu de la correction gravitationnelle) et montrent que la durée de l'intervalle unitaire du TAI est trop courte de 10×10^{-13} en valeur relative. Cet écart doit-il être corrigé progressivement ou par saut de fréquence?

Avant qu'on réponde à cette question, Mr *Guinot* se propose d'examiner les possibilités offertes par le « pilotage » de la fréquence du TAI. En travaillant sur une échelle simulée présentant les propriétés du TAI et sur des étalonnages simulés au niveau de précision actuel, il a montré que, non seulement l'exactitude du TAI pouvait être supérieure à celle de chacun des étalons primaires, mais aussi que la stabilité était améliorée par rapport à celle de l'échelle « libre », même à court terme. Pour assurer la stabilité à court terme, il faut que les corrections de fréquence déduites de l'ensemble des étalonnages soient appliquées d'une manière progressive, sous forme d'une dérive de fréquence prolongée durant plusieurs années; un délai de 10 ans convient. Toutefois, ce résultat ne s'applique que si la fréquence initiale du TAI n'est pas excessivement inexacte, c'est pourquoi Mr *Guinot* propose que l'on fasse le plus tôt possible un ajustement de fréquence par saut de 1×10^{-12} et que l'on entreprenne le pilotage du TAI ensuite.

Mr *Winkler* estime toutefois qu'un saut de fréquence de 1×10^{-12} perturbera de nombreux utilisateurs qui maintiennent leurs horloges en coïncidence avec l'UTC (qui a même intervalle unitaire que le TAI). C'est, par exemple, le cas des stations de LORAN-C ou OMEGA. Il pense, de plus, qu'on ne devrait pas faire de correction avant de connaître les résultats des étalons à césium du N.P.L. et du N.R.L.M.

Mr *Becker*, qui est favorable à un saut de fréquence du TAI, fait

remarquer que l'on devrait utiliser la grande reproductibilité des nouveaux étalons primaires pour la stabilisation du TAI. Ainsi, la dérive du TAI serait réduite à quelques 10^{-14} par an.

La discussion s'ouvre. Bien que les avis soient partagés, on reconnaît que l'on doit satisfaire les exigences des utilisateurs pour lesquels la continuité importe plus que l'exactitude. D'autre part, comme d'une manière fortuite la durée de l'intervalle unitaire du TAI tend vers la seconde, il suffit, pour le moment, de laisser s'opérer cette dérive qui n'a gêné personne : l'erreur d'exactitude doit être résorbée en 5 ans environ si la dérive persiste. Il est finalement laissé à l'initiative du B.I.H. l'application d'un « pilotage » en fréquence, pourvu que la stabilité n'en soit pas amoindrie.

La *Recommandation S 4* (1974), p. S 16, est établie à l'issue de cette discussion.

5. Rapport du Groupe de travail chargé d'examiner les conséquences de la Recommandation S 2 (1972)

Ce Groupe de travail, créé à l'initiative de Mr J. V. Dunworth, président du C.C.D.S., par lettre adressée le 16 mai 1973 à tous les membres du C.C.D.S., était constitué de Mr H. Smith (R.G.O.), président, et de MM. J. A. Barnes (N.B.S.), G. Becker (P.T.B.), B. Guinot (B.I.H.), W. Markowitz (U.A.I.), J. McA. Steele (N.P.L., représentant l'U.R.S.I.), G.A. Wilkins (R.G.O.), G.M.R. Winkler (U.S.N.O.).

Il était chargé d'examiner les conséquences de la Recommandation S 2 (1972), c'est-à-dire les points suivants :

- forme de l'échelle du TAI; définition de multiples de la seconde du SI, décompte continu des secondes;
- utilisation de cette échelle pour la vie courante.

A son mandat initial est venu s'ajouter l'examen de la Résolution 2 (août 1973) des Commissions 4 (Éphémérides) et 31 (Heure) de l'Union Astronomique Internationale, qui recommande que le TAI soit changé de 32 s afin de le mettre en accord avec le Temps des Éphémérides TE.

a) Correction proposée de 32 s au TAI

En commentant son Rapport (Annexe S 6), Mr *Smith* insiste pour qu'on n'applique pas cette correction de 32 s sans avoir de bonnes raisons. Il attire l'attention sur la lettre du 4 juillet 1974 de Mr Wilkins, ancien président de la Commission 4 de l'U.A.I., qui estime que l'U.A.I. a agi trop hâtivement.

Mr *Kovalevsky* estime qu'il n'est pas possible, pour le moment, de renoncer au concept du TE. Cependant, les astronomes sont décidés à adopter la seconde du SI: les constantes des futures théories de la

mécanique céleste doivent s'y conformer. Il faut donc assurer la conformité de la seconde du TE avec celle du SI en corrigeant au besoin les valeurs numériques entrant dans les théories du mouvement des planètes. Il apparaît cependant difficile d'adopter par ce moyen l'actuelle origine du TAI, c'est pourquoi l'on propose d'apporter au TAI une correction unique de 32 s. Il faut remarquer que l'on faciliterait ainsi l'utilisation future directe du TAI comme argument des éphémérides.

Mr *Markowitz*, comme représentant de l'U.A.I., présente des arguments analogues à ceux de Mr Kovalevsky en faveur d'une correction de 32 s. Comme membre du C.C.D.S., il fait remarquer que nous ne sommes pas liés par la Résolution de l'U.A.I., mais il pense que si le changement doit être fait, il vaut mieux le faire immédiatement.

Mr *Becker* serait d'accord pour une correction du TAI de 32 s si on pouvait le convaincre que cela est vraiment nécessaire, mais il estime que les raisons données par les astronomes ne sont pas suffisamment convaincantes.

Mr *Winkler* se réfère à son mémorandum du 28 janvier 1974 : le changement présente des avantages pratiques en astronomie et pourrait le TAI d'une « préhistoire » qui lui manque. Il désire que le changement se fasse sous forme d'une redéfinition de l'origine et non par un saut de temps.

Mr *Guinot* estime que dans l'avenir on devrait renoncer au concept du temps gravitationnel qui est à la base du TE et employer en Mécanique céleste le TAI qui est la meilleure mesure du temps. Si le changement de 32 s peut favoriser la disparition du TE, il est d'accord pour le faire, mais à la condition que cela ne gêne personne et il propose que l'on s'en assure.

Il semble que les seuls utilisateurs du TAI qui puissent être gênés sont ceux qui disposent d'observations en archives, notamment pour la recherche spatiale. Il leur serait assez facile de corriger ces archives.

Finalement, on ne trouve pas d'arguments décisifs, ni en faveur du changement, ni pour le repousser. On note que les astronomes ne sont pas unanimes (lettre de Mr Wilkins) et que l'U.A.I. n'a pas suffisamment expliqué pourquoi il était désirable de mettre le TAI en accord avec le TE. Il faudrait, d'autre part, recueillir l'avis des chercheurs qui calculent des orbites précises de planètes pour assurer la navigation de sondes spatiales. Un vote indicatif donne 9 voix en faveur du changement de 32 s, 5 voix contre et 4 abstentions.

Comme le Groupe de travail « Échelles de Temps et Constantes Fondamentales » de l'U.A.I. doit se réunir en octobre 1974, il est suggéré que cette question soit réexaminée et que, le cas échéant, l'U.A.I. présente au C.C.D.S. un exposé des avantages du changement du TAI. Le C.C.D.S. prendra alors sa décision après consultation de ses membres par correspondance (*Recommandation* S 2 (1974), p. S 15).

b) *Base des temps légaux*

Le C.C.D.S. doit examiner la Résolution de la Commission I de l'U.R.S.I. (1972) et la Résolution 1 de la Commission 31 de l'U.A.I. qui recommandent que le système de l'UTC soit adopté comme base de la diffusion de l'heure normale, ainsi que le projet de Vœu du C.C.I.R. qui demande que le C.I.P.M. et la C.G.P.M. reconnaissent le système de l'UTC.

A propos des vœux du C.C.I.R., Mr *Stettler* fait remarquer qu'ils seront examinés fin juillet 1974 par l'assemblée plénière du C.C.I.R. qui les adoptera très probablement. Si des changements dans les désignations d'échelles de temps sont décidés, il est encore temps de les introduire dans les documents du C.C.I.R.

D'après Mr *Terrien*, le C.C.D.S. ne doit pas se borner à reconnaître l'UTC mais il doit exprimer sa propre opinion. Il faudrait toutefois savoir qui est responsable de la définition du système de l'UTC.

On ne peut pas répondre simplement à cette dernière question. Le C.C.I.R. a peut-être outrepassé ses attributions en définissant l'UTC, mais il a travaillé en accord avec les unions scientifiques et les groupes concernés. Le procédé qui a conduit à l'UTC a peut-être été illogique, mais il a été efficace, comme le note Mr *Winkler*. Dans ces problèmes qui touchent un très grand nombre d'intéressés, on ne peut pas répartir très strictement les responsabilités et il importe de maintenir les liens existants.

Le *Président* suggère que l'on agisse comme pour le TAI, c'est-à-dire que l'on considère que le système de l'UTC est établi par le B.I.H. On rappellera que l'U.A.I., l'Union Géodésique et Géophysique Internationale (U.G.G.I.), l'U.R.S.I., le C.C.I.R. et le C.I.P.M. sont représentés au Comité de direction du B.I.H.

Il n'y a aucune opposition de principe à recommander l'adoption de l'UTC comme base du temps officiel. La *Recommandation* S 1 (1974), p. S 14, est rédigée en ce sens.

c) *Désignation des échelles de temps*

En ce qui concerne le Temps Atomique International, il est décidé de lui conserver son nom et son symbole TAI, au moins jusqu'à ce qu'une décision soit prise sur l'introduction d'une correction de 32 s. Selon le *Président*, il conviendrait de changer le nom si cette correction est faite. Le problème sera étudié par correspondance si le changement de 32 s est adopté.

La désignation « Temps Universel Coordonné » donne lieu à de nombreuses critiques.

D'après Mr *Becker*, la désignation ne devrait pas être liée à la construction de l'échelle de temps et devrait, par suite, rester valable même

si le mode d'établissement change. Il propose la désignation « Temps International » (TI). Mr *Costain* ne peut pas convaincre les autorités légales de son pays d'adopter UTC. La lettre « C » pour « coordonné » apparaît comme du jargon scientifique. Ces points de vue sont soutenus par MM. *Bailey*, *Barnes*, *Orle*, *Bonanomi* et *Wilkins* (par correspondance), tandis que Mr *Leschiutta* propose « Tempus Terrestre » (TT). Plusieurs membres pensent que l'adoption de TI pourrait conduire à la disparition de GMT qui est très largement utilisé comme équivalent de Temps Universel.

Mr *Guinot* rappelle que le sigle UTC est déjà très répandu, non seulement dans les travaux scientifiques, mais aussi dans des documents destinés au public : livres de cours, documents de l'U.I.T., ouvrages de vulgarisation. Pour le public, le « U » pour « universel » apporte la même idée que le « I » pour « international ». Puisque le « C » semble difficile à expliquer, il propose de l'abandonner et de désigner UTC par UT pour l'usage général. Bien entendu, dans les usages scientifiques, on restera libre d'employer UT0, UT1, UT2 et UTC.

Ce point de vue est accepté par MM. *Winkler*, *Markowitz*, ainsi que par MM. *Audoin*, *Kovalevsky*, *Terrien* et *Smith* qui ajoutent qu'il vaut mieux ne pas changer de nom tant que les règles de l'établissement de l'échelle de temps ne changent pas. Il paraît aussi être un compromis possible pour les membres qui sont en faveur de l'adoption de IT.

Avant toute décision, il convient cependant de s'assurer qu'aucun risque de confusion n'est à craindre dans l'usage des éphémérides astronomiques et dans les documents de navigation. Mr *Kovalevsky*, chargé de cet examen, fait part de ses conclusions.

Dans les éphémérides nautiques et aéronautiques la référence utilisée est soit GMT, soit TU; dans les deux cas, on devrait prendre UT1, ce qui serait une amélioration. Dans les éphémérides astronomiques, il n'y a qu'un seul cas embarrassant : celui de la table de conversion de UT en temps sidéral; elle s'applique à toutes les formes de UT, bien qu'on n'ait pas défini les variantes correspondantes du temps sidéral. Des explications seraient nécessaires. Dans les autres tables des éphémérides utilisant l'argument UT, des erreurs de plusieurs secondes sont sans importance. En conclusion, l'abandon de la lettre « C » n'a pas de grands inconvénients.

Plusieurs membres trouvent cependant que le risque de confusion serait moindre si l'on conservait la lettre « C ». Mr *Becker* propose d'interpréter le « C » comme « conventionnel ». La solution qui est finalement retenue est d'écrire « Temps Universel (Coordonné) », afin que le mot « coordonné » puisse être abandonné dans l'usage courant.

Il est souhaitable qu'il n'y ait qu'un symbole utilisé dans toutes les langues, mais il paraît difficile de l'imposer. Le C.C.D.S. exprime sa préférence pour les symboles UTC et UT qui devraient, en particulier, être utilisés dans les applications scientifiques.

6. Élargissement des tolérances de l'UTC

Mr *Smith* fait état des travaux de la Commission d'Études 7 du C.C.I.R. L'écart maximal entre UT1 et UTC ne devrait jamais excéder $\pm 0,9$ s. Aucune action du C.C.D.S. n'est requise à ce sujet.

7. Informations sur la valeur de la vitesse de la lumière

Mr *Terrien* apporte les informations suivantes.

Le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (C.C.D.M.) a décidé en 1973 de fixer les valeurs des longueurs d'onde des raies d'absorption du méthane et de l'iode qui se trouvent au voisinage de $3,39 \mu\text{m}$ et $0,63 \mu\text{m}$. Les mesures indirectes ou directes faites par rapport à la radiation du krypton dans six laboratoires s'accordent à $\pm 4 \times 10^{-9}$ près en valeur relative. La dispersion des mesures s'explique par le manque de précision de la réalisation du mètre, de sorte qu'il convenait de s'accorder sur les valeurs à utiliser pour éviter la prolifération de systèmes différents.

D'autre part, on a pu réaliser une mesure de la fréquence de la raie du méthane à quelques unités de 10^{-10} près. Il en résulte donc une mesure de la vitesse de la lumière c . Comme les astronomes effectuent des mesures précises de distances par temps de vol d'impulsions électromagnétiques, ils ont besoin de c pour assurer la conversion dans les unités du SI. C'est pourquoi le C.C.D.M. a déclaré que, de l'ensemble des résultats expérimentaux, il résulte que $c = 299\,792\,458$ m/s. Le C.C.D.M. n'a pas promis que cette valeur serait définitive; mais il est très probable qu'elle ne sera pas changée.

Il reste la possibilité soit de redéfinir le mètre d'après une longueur d'onde, ce qui pourrait conduire à changer la valeur de c , soit de fixer c et de réaliser ainsi une nouvelle définition du mètre. Cependant, dans la pratique, il apparaît possible de définir le mètre d'après une longueur d'onde, dans les limites d'incertitude de l'expérience, sans changer la valeur de c .

Mr *Winkler* demande pourquoi on n'envisage pas de prendre comme unité de base la vitesse de la lumière. Mr *Terrien* répond que cela bouleverserait le Système International d'Unités qu'il importe de garder sans changement important afin de ne pas gêner sa diffusion. On se contentera sans doute de définir le mètre comme un nombre de longueurs d'onde du césium. Une telle définition ne pourrait pas être utilisée directement pour des mesures de longueur d'étalons courants, mais on utiliserait des radiations étalons secondaires.

En conclusion d'une discussion ouverte par Mr *Becker*, le C.C.D.S. exprime l'avis que, quelles que soient les décisions concernant la définition du mètre et la vitesse de la lumière, on ne doit pas pour le moment changer la définition de la seconde.

* * *

Le *Président* remercie les membres du Comité Consultatif pour leur participation et plus particulièrement Mr Smith, président du Groupe de travail, dont l'excellent rapport a fourni une base solide pour les discussions. Il rappelle qu'un certain travail par correspondance pourrait être nécessaire au sujet d'un changement d'origine du TAI destiné à le mettre en accord avec le TE.

La session est close le 11 juillet 1974 à 17 h.

(Septembre 1974)

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

Le Temps Universel (Coordonné) comme base du temps officiel dans tous les pays

RECOMMANDATION S 1 (1974)

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

AYANT CONSTATÉ que le Temps Universel (Coordonné), UTC, a été adopté par le Comité Consultatif International des Radiocommunications, qu'il s'est révélé satisfaisant et qu'il est presque universellement utilisé,

CONSIDÉRANT que le Système UTC est établi par le Bureau International de l'Heure, que les informations correspondantes sont mises à la disposition des utilisateurs au moyen des signaux horaires étalons, qu'il fournit aux usagers du Temps Universel et du Temps Atomique une référence immédiate et que l'intervalle unitaire de l'UTC est la seconde du SI,

CONFIRME la déclaration du C.C.D.S. de 1972 selon laquelle l'acceptation quasi universelle de l'UTC peut fournir une base solide pour un système horaire acceptable internationalement,

(*) Ces cinq Recommandations ont été approuvées par le Comité International des Poids et Mesures à sa 63^e session (septembre 1974).

ESTIME que le moment est venu d'inviter la Conférence Générale des Poids et Mesures (C.G.P.M.) à recommander l'adoption de l'UTC comme base du temps officiel dans tous les pays,

ET CONSIDÈRE que la C.G.P.M. devrait recommander que l'on continue à mettre à la disposition des utilisateurs les informations supplémentaires fournies par le Système UTC.

Notes explicatives :

1) Sauf dans les cas où une confusion pourrait en résulter, la désignation Temps Universel (Coordonné), UTC, peut sans inconvénient être abrégée en Temps Universel, UT.

2) Le C.C.D.S. remarque qu'il y aurait avantage à désigner dans toutes les langues le Temps Universel (Coordonné) par UTC et le Temps Universel par UT.

3) GMT, qui est encore utilisé largement, peut être considéré dans la plupart des cas comme équivalent à UT. Il faut espérer que l'expression GMT sera progressivement remplacée par l'expression UT.

4) Le Bureau International de l'Heure (B.I.H.) est un des services permanents de la Fédération des Services Astronomiques et Géophysiques; il est placé sous la surveillance scientifique d'un Comité de direction qui comprend des représentants de l'U.A.I., de l'U.G.G.I., de l'U.R.S.I., du C.I.P.M. et du C.C.I.R. Il assume la responsabilité de l'établissement du Temps Atomique International (TAI), en accord avec les Résolutions 1 et 2 de la 14^e C.G.P.M. (1971). Lorsque le système UTC a été adopté par le C.C.I.R. pour la transmission radioélectrique des signaux horaires étalons, il a été demandé au B.I.H. de maintenir et de mettre en pratique ce système.

Différence entre le Temps des Éphémérides et le Temps Atomique International

RECOMMANDATION S 2 (1974)

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

RECOMMANDE que le texte suivant soit transmis à l'Union Astronomique Internationale (U.A.I.) :

« La Résolution N^o 2 adoptée conjointement par les Commissions 4 et 31 de l'U.A.I., à Sydney, en août 1973, fait état de « la nécessité » d'établir l'accord entre le TE et le TAI et prie le C.C.D.S. de décaler le TAI de 32 secondes. Cependant, cette requête n'a pas été accompagnée d'arguments permettant au C.C.D.S. de justifier une proposition de changement devant le Comité International des Poids et Mesures. De plus, certains documents récemment reçus par le C.C.D.S. semblent indiquer que l'accord entre le TE et le TAI pourrait être obtenu sans modifier le TAI.

« Comme le Groupe de travail « Échelles de Temps et Constantes Fondamentales » de l'U.A.I. doit se réunir en octobre 1974, le C.C.D.S. suggère que cette question soit examinée à cette occasion et que, si l'U.A.I. est d'accord avec les conclusions de ce Groupe de travail, elle transmette ses recommandations au C.C.D.S. Si l'U.A.I. recommande un décalage de 32 secondes du TAI, cette recommandation devrait être accompagnée d'un exposé des avantages que procurerait ce changement. »

Amélioration des comparaisons internationales de temps et de fréquence

RECOMMANDATION S 3 (1974)

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

CONSIDÉRANT

— que les comparaisons intercontinentales de temps et de fréquence utilisent principalement le réseau Loran C et atteignent une exactitude de quelques dixièmes de microseconde;

— que, d'après l'expérience, les possibilités du réseau Loran C en matière d'exactitude ne sont peut-être pas toujours mises à profit, surtout à long terme;

— que des portions importantes de la surface du globe ne sont pas couvertes par le réseau Loran C;

— que les transports d'horloges atomiques constituent actuellement le moyen le plus sûr et le plus exact pour comparer les échelles de temps;

RECOMMANDE

— que l'on recherche, en plus des méthodes actuellement utilisées, des méthodes nouvelles ou plus efficaces pour les comparaisons intercontinentales de temps et de fréquence et que les résultats soient communiqués au Bureau International de l'Heure (B.I.H.);

— que les durées de propagation des signaux de télévision et de Loran C soient déterminées régulièrement avec exactitude, au moins une fois par an, par transport d'horloges ou par tout autre moyen;

— que l'on utilise autant que possible des appareils et des méthodes d'étalement identiques afin de tirer le meilleur parti des possibilités du Loran C ou de la télévision;

— que les comparaisons par transport d'horloges soient poursuivies et que le B.I.H. en soit informé à l'avance.

Amélioration de l'exactitude du Temps Atomique International

RECOMMANDATION S 4 (1974)

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

CONSIDÉRANT

— le succès déjà obtenu par le Bureau International de l'Heure (B.I.H.) dans le maintien de l'échelle de Temps Atomique International (TAI);

— que, d'accord avec la « Mise en pratique du Temps Atomique International », l'intervalle unitaire du TAI devrait être égal à la seconde du SI réalisée au niveau de la mer;

— que les mesures de plusieurs laboratoires indiquent une dérive en durée de l'intervalle unitaire du TAI;

— qu'il est souhaitable que d'autres laboratoires entreprennent de contribuer à l'exactitude du TAI;

— que pour de nombreux usagers la continuité et la stabilité du TAI sont d'une importance majeure et qu'il est par conséquent désirable de restreindre les ajustements de fréquence du TAI à une valeur correspondant aux fluctuations aléatoires du TAI;

— qu'un algorithme a été mis au point par le B.I.H. afin de piloter l'intervalle unitaire du TAI selon la meilleure estimation de la seconde, tout en maintenant la stabilité de l'échelle;

RECOMMANDE

— que les laboratoires poursuivent le développement d'étalons primaires de fréquence et de temps;

— que les laboratoires déterminent périodiquement l'intervalle unitaire du TAI et qu'ils communiquent leur estimation au B.I.H.;

— que l'algorithme soit mis en service par le B.I.H.

Progrès futurs du Temps Atomique International par l'emploi de nouveaux étalons

RECOMMANDATION S 5 (1974)

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

CONSIDÉRANT

— qu'il existe des horloges à hydrogène du type maser dont la stabilité à long terme est comparable à celle des meilleures horloges à césium;

— que des recherches sont en cours afin de mettre au point d'autres horloges à hautes performances;

EST D'AVIS que l'introduction en temps utile, dans l'algorithme du TAI, de données obtenues avec des horloges autres que les horloges à jet de césium, pourrait améliorer la stabilité et l'uniformité du TAI;

ET RECOMMANDE

— que les données disponibles en provenance d'horloges autres que les horloges à césium soient prises en considération pour l'établissement du TAI avec les poids statistiques qui seront déterminés par le Bureau International de l'Heure (B.I.H.);

— que les laboratoires étudient et mettent en service des étalons de fréquence à hautes performances autres que les appareils à jet de césium, qu'ils effectuent des comparaisons avec les étalons primaires à césium sur une longue durée et qu'ils communiquent les résultats au B.I.H.

ANNEXE S 1

**Documents de travail
présentés à la 7^e session du C.C.D.S.**

Document
CCDS/

- 74-1 Résolutions N^{OS} 4 et 6 de l'Assemblée Générale de l'Union Astronomique Internationale, Sydney, août 1973 ; résolutions N^{OS} 1, 2 et 4 des Commissions 4 et 31.
- 74-2 On the use of ET and TAI, by Wm. Markowitz (voir Annexe S 2).
- 74-3 B.I.H. - Note sur l'établissement du Temps atomique international de juillet 1972 à mai 1974, par M. Granveaud et B. Guinot.
L'essentiel du contenu de ce document figure dans le Rapport au C.I.P.M.
- 74-4 Instituto y Observatorio de Marina, San Fernando (Espagne).- Distribution of the unit interval, the hertz and their multiples from the international atomic time scale, by A. Orte (voir Annexe S 3).

Document

CCDS/

- 74-5 B.I.H. - Note sur l'exactitude du temps atomique, par B. Guinot (voir Annexe S 4).
- 74-6 P.T.B. - Measurements of the TAI frequency with the primary cesium standard CS1 of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt, by G. Becker (voir Annexe S 5).
- 74-7 Documents 7/1007, 7/1009, 7/1012, 7/1013, 7/1015 et 7/1018 adoptés par la Commission d'études 7 du Comité Consultatif International des Radiocommunications en mars 1974.
Ces documents ont été soumis à l'approbation de la XIII^e Assemblée plénière du C.C.I.R. (Genève, juillet 1974).
- 74-8 Interim report by Chairman Working Party on time scales, by H.M. Smith (voir Annexe S 6).
- 74-9 P.T.B. - Contribution to C.C.D.S.-74, by G. Becker (voir Annexe S 7).
- 74-10 N.R.C. - For : Consultative Committee for the Definition of the Second (voir Annexe S 8).
- 74-11 N.B.S. - N.B.S. Submission to the Consultative Committee for the Definition of the Second (voir Annexe S 9).
- 74-12 P.T.B. - Frequency change of TAI, by G. Becker (voir Annexe S 10).
- 74-13 P.T.B. - Comment on the interim report by chairman Working Party on time scales, by G. Becker (voir Annexe S 11).
- 74-14 N.R.L.M. - A cesium frequency standard of the National Research Laboratory of Metrology, by Y. Koga, Y. Nakadan and J. Yoda (voir Annexe S 12).

Document
CCDS/

- 74-15 R.R.L. et N.R.L.M. - Report to the 7th C.C.D.S. meeting, (voir Annexe S 13).
- 74-16 Laboratoire de l'Horloge Atomique.- Rapport pour le C.C.D.S. 1974 (voir Annexe S 14).
- 74-17 R.R.L. - Recent works on hydrogen maser at R.R.L., by Y. Saburi, M. Kobayashi and K. Yoshimura (voir Annexe S 15).
- 74-18 N.R.C. - Broad band data networks and TAI (voir Annexe S 16).
- 74-19 N.P.L. - Contribution by N.P.L. to the 7th meeting of the C.C.D.S. (voir Annexe S 17).
- 74-20 I.E.N. - Contributions to C.C.D.S.-74 (voir Annexe S 18).
- 74-21 Instituto y Observatorio de Marina, San Fernando (Espagne).- Dating on atomic days, by A. Orte (voir Annexe S 19).
- 74-22 Lettre adressée le 4 juillet 1974 par G.A. Wilkins à J.V. Dunworth.- C.C.D.S. Working Party on time scales (voir Annexe S 20).
- 74-23 U.S.N.O. - Loran-C Northwest Pacific chain (graphique).
- 74-24 Status report on primary frequency standards in North America and Europe, by Helmut Hellwig (voir Annexe S 21).
- 74-25 Notes and comments on astronomical time-scales, by G.A. Wilkins (août 1973).
- 74-26 Memorandum to the Consultative Committee for the Definition of the Second (C.C.D.S.) Working Party, by G.M.R. Winkler (voir Annexe S 22).

Document

CCDS/

- 74-27 A 32-second change of TAI, by R.L. Duncombe (voir
 Annexe S 23).
- 74-28 Lettre adressée le 22 avril 1974 par H. Enslin à
 B. Guinot.
 Il s'agit de la réponse à une lettre non publiée.
-

ANNEXE S 2

Emploi du TE et du TAI

Par W. MARKOWITZ

Union Astronomique Internationale

(Traduction du Document CCDS/74-2)

I. INTRODUCTION

Le TAI est une échelle de temps atomique de grande précision, continue et immédiatement disponible. Ni l'UTC ni le TE ne possèdent toutes ces qualités. En conséquence, l'emploi du TAI va se généraliser pour dater les observations astronomiques. On peut connaître en TAI la date de n'importe quelle observation faite depuis juin 1955, époque à laquelle a commencé le décompte continu des périodes cohérentes du rayonnement produit par les horloges atomiques.

Les éphémérides des planètes et de leurs satellites naturels sont publiées avec TE comme argument ; comme TE n'est pas disponible directement il faut effectuer une conversion. Celle-ci serait éliminée si l'on amenait TE et TAI en concordance étroite.

Les relations entre TE et TA (ou TAI) sont complexes. TE n'est même pas défini de façon unique. Deux propositions avaient été faites à la 15^e Assemblée Générale de l'U.A.I., à Sydney en août 1973, au cours de réunions conjointes des Commissions 4 (Ephémérides) et 31 (Temps) pour résoudre ce problème, et faire concorder étroitement TE et TAI. En substance il s'agissait :

- 1.- de décaler TAI de 32 s exactement ;

2.- puis de modifier les constantes arbitraires et d'améliorer les théories du mouvement de la Lune et des planètes utilisées pour leurs éphémérides de façon à faire concorder aussi bien que possible TE et TAI.

Le point 1 a été adopté par les Commissions 4 et 31. S'il est adopté par le C.C.D.S. (et le C.I.P.M.), cela ouvrirait la voie à l'adoption du point 2 par la Commission 4 de l'U.A.I. Le point 2 a été proposé par Wilkins (1973). Vraisemblablement, chaque éphéméride serait à nouveau modifiée lorsque cela serait nécessaire.

II. DÉFINITION DU TE

Le concept de TE est bien défini ; TE est la variable indépendante dans les théories de la Lune et des planètes. Toutefois, la définition pratique, qui conduit à des valeurs numériques spécifiques de TE, n'est pas bien formulée. On détermine TE en comparant la position astronomique d'un corps en orbite avec sa position donnée par l'éphéméride. En partant de la Lune ou des planètes, ou en utilisant différentes éphémérides disponibles pour chacune, ou bien différents équinoxes, etc., on obtient des TE différents. En théorie, la définition pratique est fondée sur la *Théorie du Soleil* de S. Newcomb. Cependant, même là il existe des difficultés (Duncombe 1974), de telle sorte que TE n'est pas défini de façon unique.

III. CONSÉQUENCES

Si l'on adoptait les propositions dont il a été question, les différents TE seraient en accord étroit avec TAI et entre eux. On n'effectuerait qu'un seul décalage de TAI. A l'avenir on ferait des modifications dans les éphémérides, si nécessaire, pour maintenir faible l'écart TE-TAI.

Le concept de TE fondé sur la gravitation et la dynamique subsisterait. Une éventuelle variation séculaire de la constante de gravitation par rapport aux constantes électriques pourrait être décelée à partir de l'analyse des changements séculaires des constantes arbitraires qui figurent dans les théories.

La dénomination TE pourrait être remplacée par TA (ou TAI) dans les tables des éphémérides nationales. L'opportunité de ce changement devrait être discutée par la Commission 4 de

de l'U.A.I. Wilkins (1973) était favorable au maintien de la dénomination TE.

IV. RÔLES DU TE ET DU TAI DANS L'AVENIR

On peut utiliser TAI pour dater n'importe quelle série d'observations qui ont commencé depuis 1955, par exemple celles de satellites artificiels. Les analyses d'orbites et les éphémérides qui en résultent utiliseraient aussi TAI. TE ne serait pas impliqué, sauf comme concept. Ainsi, seul TAI apparaîtrait.

Cependant, les recherches sur les mouvements de la Lune et des planètes incluent des observations antérieures à 1955, alors que TA n'existait pas. On doit donc utiliser TE dans ces cas-là. On obtient une échelle de TE particulière pour chaque objet. On peut imposer que ces échelles particulières soient voisines de TAI depuis 1955 et constituer par combinaison de ces échelles particulières une échelle de TE qui concorde au mieux avec toutes les observations. On obtiendra ainsi une échelle de TE s'étendant à la période antérieure à 1955 et liée au TAI après 1955. Cependant, une telle échelle de TE demeure une échelle de TE, fondée sur des observations astronomiques et non sur l'échelle de TA.

On ne peut constituer aucune échelle de TE qui soit un équivalent d'une échelle de TA. Si l'on pouvait le faire, il serait possible de déterminer les variations saisonnières de la vitesse de rotation de la Terre pour 1920 par exemple. Cela, on ne peut le faire. Pour éviter toute confusion, on ne devrait employer le terme "échelle de TA" que pour caractériser une échelle fondée directement sur le fonctionnement d'horloges atomiques.

V. RÉSUMÉ

L'emploi du TAI va se généraliser pour dater les observations astronomiques depuis 1955, en raison de la précision élevée, de la disponibilité immédiate et de la commodité de cette échelle. Aucune échelle de TA n'est disponible pour les observations antérieures à 1955.

Des propositions ont été faites pour faire concorder les différentes échelles de TE avec le TAI et par conséquent entre elles. L'adoption de ces propositions simplifierait grandement les problèmes posés par la garde du temps.

Les observations, les analyses d'orbites et les éphémérides peuvent toutes être exprimées et calculées en fonction du TAI pour des objets tels que les satellites artificiels, dont l'observation a commencé depuis 1955. Toutefois, les études des mouvements de la Lune et des planètes, qui comportent des observations faites antérieurement à 1955, nécessitent l'emploi du TE.

(30 avril 1974)

BIBLIOGRAPHIE

- DUNCOMBE (R.L.), Annexe 2 à la lettre du 7 janvier 1974 adressée à H.M. Smith, Président du Groupe de travail du C.C.D.S. sur les Échelles de Temps.
- WILKINS (G.A.), Notes and comments on astronomical time-scales (août 1973). (Document multicopié, 1 page).
-

ANNEXE S 3

Diffusion de l'intervalle unitaire, du hertz et de leurs multiples à partir de l'échelle de Temps Atomique International

Par A. ORTE

Instituto y Observatorio de Marina (Espagne)

(Traduction du Document CCDS/74-4)

La métrologie du temps est fondée sur deux recommandations internationales :

A.- la définition de la seconde au moyen d'une transition de l'atome de césium (13^{e} C.G.P.M.) ;

B.- la définition et la mise en oeuvre de l'échelle de Temps Atomique International, TAI (14^{e} C.G.P.M.).

Ces deux recommandations sont également nécessaires et doivent être considérées ensemble car, comme on l'a démontré en pratique, on ne peut séparer les problèmes qui concernent l'unité (A) et ceux qui concernent l'échelle (B). Il en est de même pour les deux opérations fondamentales, la *définition* et le *décompte* qui, en raison de leur nature même, sont conjointement présentes dans toute mesure liée au temps.

L'échelle de TAI, fondée sur la définition de la seconde, inclut et matérialise la définition des multiples de l'unité. En ce sens, elle s'avère capable de reproduire indéfiniment tous les intervalles de temps, y compris la seconde, avec une exactitude que l'on peut déterminer au moyen de sa courbe de stabilité. Par ailleurs, cette échelle résout le problème des dates et, comme elle est étudiée de façon continue, elle joue le rôle d'une vraie "mémoire", utilisée même pour son propre perfectionnement. Cette mémoire permet de corriger *a posteriori*

toute mesure qui se réfère à cette échelle.

Dans ces conditions, il semble intéressant d'utiliser les qualités métrologiques éminentes du TAI en conseillant l'emploi de cette échelle pour la diffusion de la seconde dans les différents pays. Cette diffusion répondrait au concept d'"étalons légaux" utilisés dans chaque pays pour matérialiser de nombreuses unités SI et pourrait aisément être étendue pour couvrir la plupart des pays membres de la "Convention du Mètre".

Le procédé courant de production et de diffusion de l'unité est le suivant :

a.- Matérialisation de l'intervalle fondamental au moyen de résonateurs passifs (étalons de laboratoire), secondés par un groupe d'horloges atomiques commerciales, jouant le rôle de mémoire.

En tenant compte du fait que les propriétés métrologiques du TAI existent - éventuellement avec une plus grande perfection - pour chacune des horloges qui contribuent à former le Temps International, grâce à la continuité des observations, on propose en conséquence que la diffusion de l'intervalle unitaire (seconde), du hertz et de leurs multiples soit effectuée :

b.- Au moyen d'une échelle de temps atomique étudiée de façon continue par rapport au TAI. Une échelle UTC semble la plus appropriée.

Bien que les deux solutions et leur combinaison ($a + b$) soient couramment utilisées dans la pratique, il semble qu'elles devraient faire l'objet d'une recommandation internationale.

La solution b pourrait profiter à un grand nombre de pays, en permettant une normalisation à un niveau supérieur au niveau actuel.

(11 mai 1974)

ANNEXE S 4

Note sur l'exactitude du temps atomique

par B. GUINOT

Bureau International de l'Heure

(Document CCDS/74-5)

On considère une échelle de temps, dite échelle de référence, affectée de bruit aléatoire. Grâce à des étalons de fréquence primaires, on dispose de mesures de la durée de l'unité de l'échelle de référence pour différentes dates. Comment utiliser ces étalonnages, pris dans le passé, et l'échelle de référence pour construire, en temps réel, une échelle dont la fréquence est aussi exacte et aussi stable que possible ?

Yoshimura (1972) a traité le problème des poids à donner aux étalonnages supposés de durée et de précision égales dans le cas où l'échelle est affectée de bruit de scintillation et de bruit blanc en fréquence. Nous avons étendu la solution à des étalonnages quelconques et au bruit blanc en phase. Dans cette solution, l'erreur de prédiction de fréquence est minimisée sur un intervalle qu'on doit choisir à l'avance ; mais on constate que la pondération et l'erreur de prédiction sont très peu sensibles à la durée de l'intervalle de prédiction.

Dès qu'un nouvel étalonnage est connu, il paraît naturel de l'ajouter à la série des étalonnages acquis, d'établir une nouvelle pondération et de calculer la correction de fréquence prédite sur une durée s'étendant jusqu'à la date escomptée d'un étalonnage supplémentaire ; on peut établir l'échelle pilotée,

dont l'exactitude en fréquence est optimisée, en appliquant immédiatement à l'échelle de référence la correction de fréquence obtenue. Mais on peut craindre, soit d'utiliser des étalonnages trop anciens, dont le rôle serait néfaste en présence de bruits non aléatoires, soit, si on limite le nombre d'étalonnages utilisés, d'introduire un défaut de stabilité en fréquence dans l'échelle, par suite des sauts de fréquences qu'elle subit.

Pour élucider ces problèmes dont l'étude théorique mettrait en jeu un nombre excessif de paramètres, nous avons fait des essais sur une échelle de temps simulée sur près de 60 ans, ayant la forme et les propriétés statistiques du présent TAI, à l'aide d'étalonnages également simulés. Ces étalonnages sont affectés d'erreurs non corrélées, approximativement au niveau de précision actuel ; ils sont irrégulièrement espacés, leur rythme moyen étant de 2 par an environ.

Dans une première série d'essais, on suppose qu'il n'existe pas d'effets non aléatoires dans le TAI. On a tenté d'utiliser le dernier étalonnage seulement, puis les 10 derniers (étendus sur 4,4 ans) puis les 30 derniers (étendus sur 13 ans). Les trois méthodes donnent à l'échelle pilotée une exactitude moyenne comparable. Quant à sa stabilité en fréquence, elle est toujours améliorée par rapport à celle de l'échelle de référence pour un temps d'échantillonnage supérieur à une dizaine d'années, mais elle est réduite pour un temps d'échantillonnage plus court. Toutefois, cette réduction n'est que de 16 % par l'usage de 30 étalonnages (fig. 1).

Au lieu d'appliquer immédiatement la nouvelle fréquence à l'apparition de chaque étalonnage, on peut introduire un rattrapage de fréquence progressif. Si ce rattrapage s'effectue en 10 ans, par exemple, on constate que la stabilité de l'échelle pilotée est toujours supérieure à celle de l'échelle de référence, mais l'exactitude est un peu moins bonne que dans les essais précédents.

Dans une deuxième série d'essais, on suppose que l'échelle de référence subit, outre le bruit aléatoire, une dérive de fréquence (prise égale à $0,5 \times 10^{-13}$ par an). L'emploi pur et simple de la pondération du cas des bruits aléatoires conduit à des stabilités analogues, mais à des erreurs d'exactitude d'autant plus grandes qu'on a pris un nombre plus élevé d'étalonnages, ou un délai de rattrapage plus long.

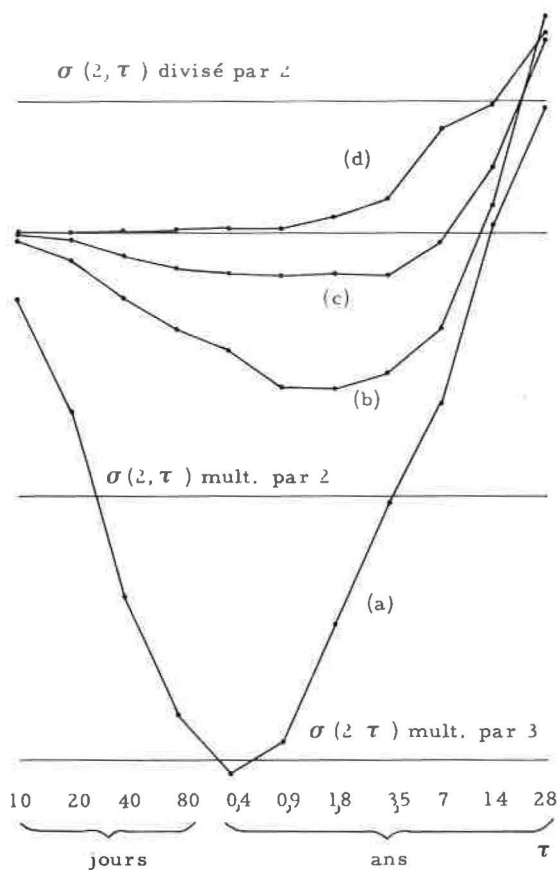


Fig. 1.- Stabilité comparée d'échelles pilotées par rapport à l'échelle de référence libre.

traitement	défaut d'exactitude
(a) correction par 1 étalonnage	- 0,18 x 10 ⁻¹³
(b) correction par 10 étalonnages	- 0,19
(c) correction par 30 étalonnages	- 0,22
(d) correction par 10 étalonnages avec rattrapage en 10 ans	- 0,38

On peut toutefois, si on a des raisons de penser que la dérive de fréquence existe et se maintiendra pendant la durée de prédiction de fréquence, tenter de la déterminer au préalable et assurer ainsi l'exactitude et la stabilité.

En conclusion, on constate qu'un usage approprié des étalonnages en fréquence du TAI pourrait non seulement assurer son exactitude mais également améliorer sa stabilité à moyen comme à long terme (de quelques mois à de nombreuses années). La pondération des étalonnages passés est peu critique, mais la façon d'appliquer les corrections de fréquence joue un rôle important pour la stabilité.

Après un saut de fréquence du TAI, de l'ordre de 1×10^{-12} , qui assurera son exactitude à quelques unités de 10^{-13} près, nous proposons :

- de maintenir le calcul d'une échelle de référence (qui est le présent TAI, mais qui ne sera conservée que pour l'usage intérieur du B.I.H. et des organismes de recherche) ;
- de déduire le TAI de cette échelle de référence par "pilotage" en fréquence suivant un procédé qui ne détériore pas la stabilité tout en assurant le maintien de l'exactitude.

BIBLIOGRAPHIE

YOSHIMURA (K.), 1972, NBS Technical Note 626.

(Mai 1974)

**Mesures de la fréquence du TAI
avec l'étalon primaire à césium CS1 de la P.T.B.**

Par G. BECKER

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Rép. Féd. d'Allemagne)

(Traduction du Document CCDS/74-6)

Les résultats obtenus entre octobre 1969 et mars 1973 ont été publiés⁽¹⁾. La reproductibilité des différences de fréquences mesurées se situe entre $0,6 \times 10^{-13}$ et $2,0 \times 10^{-13}$ en valeur relative, tandis que l'incertitude des résultats se situe entre $1,9 \times 10^{-13}$ et $2,7 \times 10^{-13}$. Entre 1970 et 1973 on a trouvé une diminution systématique de la fréquence du TAI d'environ 1×10^{-13} par an, en valeur relative. En mars 1973 la fréquence du TAI était trop élevée par rapport à l'unité SI de $(11,5 \pm 2,0) \times 10^{-13}$, en valeur relative.

Entre mai et septembre 1973 on a effectué sept mesures supplémentaires de fréquence en utilisant la méthode d'inversion de la direction du jet aussi bien que la méthode des deux vitesses. Il résulte de l'ensemble des mesures que la fréquence de TAI était trop élevée de $(11,0 \pm 1,5) \times 10^{-13}$ en valeur relative avec une dispersion des sept mesures d'environ $0,7 \times 10^{-13}$.

Au cours de l'année 1973 on n'a observé aucun changement systématique de la fréquence du TAI dépassant les limites de la précision.

(24 mai 1974)

(1) BECKER (G.), Frequenzvergleiche mit dem primären Zeit- und Frequenznormal CS1 der PTB zwischen 1969 und 1973, *P.T.B.-Mitt.*, 83, 1973, p. 319.

ANNEXE S 6

Rapport du Président du Groupe de travail sur les échelles de temps, présenté au Président du C.C.D.S.

Par H. M. SMITH

(Traduction du Document CCDS/74-8)

Note. Ce rapport a été adressé aux Membres du C.C.D.S. accompagné de la lettre suivante (traduction) du directeur du B.I.P.M.

A tous les membres du C.C.D.S.

Le rapport intérimaire ci-après, rédigé par le Président de notre Groupe de travail sur les Echelles de Temps, vous est envoyé pour information. Il n'a pas été soumis au Groupe de travail et il n'a pas été approuvé, dans son ensemble, par ce Groupe, car il existe encore des divergences d'opinion. Cependant, il procurera un important matériel de base, en particulier pour considérer trois questions qui ont été soumises au C.C.D.S. par l'U.A.I., l'U.R.S.I. et le C.C.I.R.

- (a) Doit-on introduire un changement de 32 s dans le TAI afin de l'accorder avec le TE ? (Note : le Groupe de travail ne donne pas les raisons qui ont conduit l'U.A.I. à recommander un changement de 32 s dans le TAI ; elles doivent, sans aucun doute, être familières à la majorité des membres).
- (b) Le C.C.D.S. doit-il faire une déclaration recommandant l'adoption de l'UTC comme base de la diffusion de l'heure normale dans tous les pays ?
- (c) Quels changements doit-on apporter aux noms des échelles de temps ?

Mr Dunworth espère que vous arriverez bien informés à la réunion de juillet, prêts à discuter tous ces points et, en particulier, à vous mettre en accord sur une recommandation au C.I.P.M. au sujet des deux premiers.

Le Directeur

J. Terrien

1. INTRODUCTION

Il fut immédiatement clair que toute recommandation du C.C.D.S. sur les échelles de temps aurait des implications lointaines. De nombreuses disciplines sont concernées par les aspects scientifiques, tandis que les applications civiles et légales exigent du soin et de la prudence. Même parmi les membres du Groupe de travail, des divergences d'opinion ont été rencontrées et les discussions ont inévitablement dépassé les limites de notre mandat.

Le rapport intérimaire, pour lequel le Président du Groupe de travail assume toute la responsabilité personnelle, n'a pas été soumis au Groupe de travail, ni approuvé par lui dans son ensemble. Il est en outre incomplet, car on attend encore les commentaires des membres sur les contributions les plus récemment distribuées. Il cherche simplement à indiquer les points les plus importants que le C.C.D.S. aura à discuter.

2. MANDAT

2.1. Les documents du C.C.D.S. à considérer sont la Recommandation S 2 (1972)* et la Déclaration sur l'usage légal du Temps Universel Coordinné (1972)*.

2.2. En mai 1973, le Président du C.C.D.S. (Mr J.V. Dunworth) a établi un Groupe de travail ayant le mandat suivant :

(1) Étudier la forme à donner à l'échelle TAI et faire des recommandations à ce sujet ; en particulier, quels multiples de

* C.C.D.S., 6^e session, 1972, p. S 22.

la seconde du SI doivent être définis et quel est le système de comptage continu souhaitable.

(2) Faire des études et préparer des recommandations sur l'échelle de temps pour l'usage général, basée sur la seconde du SI, mais exprimée en jours, heures, minutes, etc. et reliée à la rotation de la Terre.

(3) Le Groupe de travail doit établir un rapport et faire des recommandations avant la prochaine session du C.C.D.S.

2.3. La composition du Groupe de travail a été fixée par Mr Dunworth pour couvrir un spectre étendu d'opinions. Les personnes suivantes ont été désignées :

J.A. Barnes	N.B.S.
G. Becker	P.T.B.
B. Guinot	B.I.H.
W. Markowitz	U.A.I.
J. McA Steele	N.P.L. (représentant l'U.R.S.I.)
G.A. Wilkins	R.G.O.
G.M.R. Winkler	U.S.N.O.

Mr H.M. Smith a été convié à présider le groupe.

2.4. Tous les membres du Groupe de travail ont soumis une ou plusieurs contributions écrites. Des contributions d'autres personnes ont été reçues; elles ont été transmises à tous les membres. La majorité des membres ont assisté à l'Assemblée Générale de l'U.A.I. à Sydney (1973) et ont pris part aux discussions, soit comme membres, soit comme observateurs. Une autre occasion pour les discussions fut la Réunion Intérimaire du Groupe d'Etude 7 du C.C.I.R. (1974). Quelques membres assisteront à la réunion de Cagliari (2-6 juin 1974).

2.4.1. La 17^e Assemblée Générale de l'U.R.S.I. (1972) a adopté une recommandation demandant que UTC soit adopté comme base de la diffusion de l'heure normale (Résolution de la Commission I).

2.4.2. A la réunion conjointe des Commissions 4 (Éphémérides) et 31 (Heure) de l'U.A.I., des résolutions ont été adoptées qui recommandent (1) l'adoption du système UTC comme base de la diffusion de l'heure normale ; (2) l'introduction d'un changement de + 32 s dans l'échelle du TAI afin de le mettre en accord avec le TE ; (3) l'utilisation de l'expression "Date Julienne Modifiée" (MJD) dans une acception unique ; et (4) un élargissement de la tolérance entre UT1 et UTC.

2.4.3. Plusieurs documents soumis à la réunion intérimaire du GE 7 du C.C.I.R. eurent trait aux questions à considérer

par le Groupe de travail ; mais il faudra particulièrement examiner la version revue de l'Avis 460 (avec ses annexes), concernant les nouvelles règles de mise en pratique du système UTC dans les émissions de signaux horaires.

2.5. Il est nécessaire d'insister sur le fait qu'une grande variété d'opinions ont été émises : un certain nombre de fois les membres du Groupe de travail ont modifié leurs opinions initiales à la suite des discussions. Ce document ne prétend pas inclure toutes les nombreuses suggestions qui ont été reçues. On a seulement tenté de placer dans des rubriques très larges certains des sujets qui devront être discutés par le C.C.D.S., de considérer certaines actions possibles et les conséquences auxquelles elles pourraient conduire.

3. BASE DES ÉCHELLES DE TEMPS

3.1. L'unité nominale du TAI est la seconde du SI qui fut définie de sorte qu'elle ait une durée égale à celle de la seconde des éphémérides, déterminée au cours de l'intervalle 1955-1958. L'origine du TAI, cependant, est définie par rapport au temps universel. La nature précise de cette définition n'est pas toujours comprise.

Le document officiel du C.C.D.S., ayant pour titre "Mise en Pratique du Temps Atomique International", qui suit la Recommandation S 4 (1970)* fixe l'origine du TAI. Il se réfère aux recommandations de l'U.A.I. (Prague, 1967). En fait, la présente échelle TAI continue, sans sauts de temps intentionnels, l'échelle originale A3 du B.I.H., désignée plus tard par TA. L'origine de A3 (et aussi de TAI) est définie dans le *Bulletin Horaire*, Série J, N° 7, comme suit :

"L'origine de A3 a été choisie pour que TU2 déf-A3 soit voisin de zéro le 1^{er} janvier 1958. En exprimant TU2 déf-A3 dans un système homogène, on a trouvé en réalité que :

TU2 déf-A3 = + 0^s,0039, le 1^{er} janvier 1958 à 0 h TU. Cette relation fixe l'origine de A3".

La Recommandation S 2 (1972) du C.C.D.S. précise "que l'échelle de Temps Atomique International (TAI) implique un décompte des secondes à partir de son origine (en janvier 1958)"

* C.C.D.S., 5^e session, 1970, p. S 22.

alors que TAI est simplement une suite de l'ancienne échelle A3 du B.I.H. avec des marques de seconde qui sont approximativement en accord avec les marques de seconde de UT2 (BIH) le 1^{er} janvier 1958. On a interprété ceci comme l'implication que l'échelle TAI peut être utilisée pour établir un système usuel d'expression des dates en secondes, minutes, heures, etc. et que les désignations de dates en UT2 et en TAI étaient en accord le 1^{er} janvier 1958. Il y a de nombreux exemples de dates et heures indiquées avec le suffixe TAI. La référence à "l'origine" du TAI dans la Recommandation S 2 du C.C.D.S. peut être source de confusions.

3.2. Les déterminations du temps des éphémérides suggèrent que la valeur moyenne de la différence entre TAI et TE est environ 32,18 s, durant l'intervalle 1956-1972. Pour de nombreux usages, il conviendrait que cette différence soit approximativement nulle : dans les applications où la précision ne doit pas excéder une seconde, les deux échelles pourraient alors être considérées comme équivalentes. Deux principales suggestions ont été avancées pour mettre TAI et TE en conformité. La première est que TE soit redéfini de sorte que la nouvelle échelle, à introduire dans les éphémérides astronomiques internationales de 1980, présenterait une discontinuité d'environ 32 s par rapport à l'échelle utilisée jusqu'en 1979. La seconde est que l'échelle du TAI soit changée, soit par un décalage de 32 s exactement de toute l'échelle, soit par un saut de temps futur de la même quantité. A une réunion commune des Commissions 4 et 31 de l'U.A.I., il a été recommandé que le C.C.D.S. considère la possibilité de changer le TAI. Si le C.C.D.S. décide de ne pas modifier le TAI, l'U.A.I. décidera (probablement en 1976) s'il faut ou non faire le changement correspondant dans la définition du temps des éphémérides.

Les arguments contre le changement du TAI peuvent être résumés comme suit :

- (1) Un changement rétroactif de l'origine conduirait à une ambiguïté et, par suite, à des confusions dans l'utilisation des données publiées avant l'exécution du changement et probablement aussi quelque temps après.
- (2) Un saut de temps détruirait la continuité du TAI, introduirait des risques d'erreur dans le calcul d'intervalles de temps entre deux dates avant et après le saut. Cela serait particulièrement gênant pour la recherche concernant les satellites artificiels et les sondes spatiales.
- (3) L'ajustement du TAI, tel qu'il est proposé, ne dispenserait

pas des échelles de temps des éphémérides et il resterait nécessaire de déterminer et de publier les différences entre le TAI et l'échelle de chaque éphéméride précise. En fait, en dépit de l'ajustement du TAI, les astronomes pourraient trouver nécessaire de faire de petits ajustements additionnels de l'ordre de 0,2 s.

(4) Les avantages que les astronomes trouveraient à mettre les deux échelles en conformité pourraient être obtenus par une redéfinition du temps des éphémérides. Les astronomes ne devraient pas espérer que tous les autres utilisateurs du TAI acceptent les risques mentionnés en (1) et (2), afin d'éviter les difficultés d'un changement de définition du TE. Nous notons à ce propos que la définition présente du TE n'est pas satisfaisante à bien des égards et que les changements dans de nombreuses éphémérides (sauf pour la Lune) dus au changement de 32 s de TE ne seraient pas supérieurs aux incertitudes des observations et des théories actuelles. L'estimation de la différence entre TE et UT avant l'introduction du temps atomique est sujette à une grande incertitude, particulièrement avant 1900.

(5) On ne peut pas prédire que TE et TAI ne divergeront pas. Des causes possibles de divergence sont : les effets relativistes, un changement séculaire de la constante de la gravitation, des modifications des théories lunaires (ainsi que l'accélération lunaire due aux marées) et une révision de la durée de l'année tropique. De tels changements sont l'affaire des astronomes et l'on ne peut penser qu'ils devraient être reportés sur le TAI.

En général, les arguments en faveur d'un changement du TAI (en accord avec la Résolution de l'U.A.I.) paraissent fondés principalement sur le désir d'accorder approximativement TAI et TE, afin que TAI puisse être utilisé dans les éphémérides astronomiques et que TAI puisse servir d'extrapolation à TE. A un degré moindre, on désire aussi que le TE puisse servir d'extension de TAI à des dates antérieures à 1955, mais les difficultés ne seraient pas sérieusement accrues si la différence TE-TAI était bien établie pour la période où TAI est disponible.

En conséquence, nous suggérons que le C.C.D.S. réexamine soigneusement la proposition de l'U.A.I. d'introduire une modification de + 32 s dans le TAI. Si, cependant, une telle modification est estimée nécessaire, il reste à choisir entre un changement rétroactif et un saut à une date future spécifiée.

3.3. On doit considérer la définition opérationnelle du TAI. Comme Président du Comité de Direction du B.I.H., puis-je faire la remarque que le Directeur, Mr Guinot, accueillera volontiers aide et avis constructifs. L'affectation au B.I.H. d'un collaborateur scientifique qualifié faciliterait sa tâche. Initialement, le TAI fut formé comme la moyenne de sept échelles de temps atomique indépendantes. L'inconvénient de cette méthode était l'impossibilité que le B.I.H. applique une méthode statistique satisfaisante dans la combinaison des données. Le B.I.H. ne disposait pas d'informations détaillées sur les procédés adoptés dans chaque établissement coopérant pour assurer la continuité ; en outre, il n'était pas possible de s'assurer de l'indépendance réelle des diverses échelles. La méthode présente consiste à combiner, par une méthode statistique, les données sur les étalons pris individuellement qui sont communiquées au B.I.H. De la sorte, le rôle des divers établissements est réduit à l'envoi régulier de relevés concernant les horloges atomiques que chacun a les moyens d'acquérir. La connaissance détaillée des facteurs affectant la qualité des horloges, ainsi que le savoir-faire des établissements coopérants sont éliminés.

Il y a aussi l'indication, d'après les quelques étalons de laboratoire, d'une légère dérive du TAI. La seconde du TAI s'écarte légèrement de la valeur de la seconde déterminée à l'aide de mesures soigneusement vérifiées faites à l'aide des étalons de laboratoire qui comportent des perfectionnements n'existant pas sur les étalons commerciaux. Il apparaît urgent de décider si le TAI doit être ajusté et quand il faudrait le faire. On doit cependant remarquer que la dérive et l'erreur cumulative qui en résulte peuvent être négligées dans de nombreuses applications astronomiques.

Un autre problème est celui des méthodes pratiques utilisées pour comparer les étalons atomiques entre les différents pays et pour permettre leur incorporation dans le TAI. A présent, le principal moyen de transfert de temps est le système LORAN-C. De petits écarts ont été notés entre les comparaisons par LORAN-C et celles faites par des horloges transportées ou à l'aide de liaisons par satellites. Il apparaît que le travail est maintenant conduit avec une précision qui est à la limite de ce que permet le système du LORAN-C actuel. Des perfectionnements pourraient apporter une amélioration marginale, mais la recherche de méthodes ayant une précision potentielle supérieure devrait être poursuivie. Il

convient d'exprimer notre appréciation de la coopération des U.S. Coast Guards (qui ont la charge du LORAN-C) et de l'U.S. Naval Observatory pour leur travail sur la mise en oeuvre des possibilités du LORAN-C pour les mesures horaires. La poursuite de leurs efforts est cependant désirable. Des établissements ne sont pas encore dans la zone de couverture du LORAN-C. De plus, les possibilités de système tels qu'OMEGA et TIMATION devraient retenir l'attention.

3.4. A la précision actuelle, il est possible d'ignorer de petits effets relativistes. Avec l'amélioration de la précision, il deviendra nécessaire d'adopter une définition plus précise du TAI et d'appliquer de petites corrections aux échelles individuelles. On suggère que, dans l'état actuel, on ne fasse pas de recommandation ferme, mais qu'on encourage l'étude de ces problèmes. Il serait aussi nécessaire de considérer un système de notation pour ces échelles corrigées.

3.5. Pour certaines applications, un comptage des secondes du TAI paraît nécessaire. Bien qu'une telle échelle ne puisse pas être largement employée, il est fortement souhaitable qu'il n'existe qu'un seul système de comptage, la prolifération de systèmes différents conduisant à la confusion. Si un système existant est considéré comme satisfaisant et s'il est déjà d'un usage assez répandu, le C.C.D.S. devrait l'approuver. Dans le cas contraire, on suggère de considérer la définition suivante du comptage des secondes : 10^{17} est équivalent à 1958 janvier 1, 0 h 0 m 0 s (TAI). Cela éliminerait la nécessité de valeurs négatives.

3.6. Deux systèmes de comptage des jours sont en usage courant ; tous deux sont basés sur UT. Les dates juliennes (DJ) ont été employées par les astronomes depuis le 16^e siècle et depuis 1955 elles sont à la base des tabulations de données à intervalles de 5 et 10 jours (Résolution 9 de la Commission 31 de l'U.A.I., 1967). Par suite du grand nombre de chiffres du système des DJ, divers systèmes modifiés ont été utilisés. Dans un effort d'unification, le système MJD a été proposé et il a été largement utilisé, en particulier dans les établissements horaires. On estime qu'il serait inapproprié d'utiliser les mêmes désignations (DJ et MJD) pour le comptage des jours atomiques. Comme pour le comptage des secondes, le C.C.D.S. pourrait approuver un système existant. Autrement, on pourrait introduire un comptage des jours atomiques qui aurait la

valeur 1 000 à la même date initiale que le comptage des secondes.

3.7. L'expérience acquise sur UTC depuis janvier 1972 a conduit à proposer des modifications mineures. A la suite de larges enquêtes, la tolérance a été discutée par l'U.A.I. et par le Groupe d'Etude 7 du C.C.I.R. en 1974. On recommande que le C.C.D.S. approuve le document correspondant du C.C.I.R. (Genève, 1974).

3.8. Aucun changement du système des fuseaux horaires n'est proposé : ce système est mondialement utilisé et il n'a pratiquement pas été modifié depuis la Conférence de Washington de 1884. Ainsi, les heures nationales et les heures des fuseaux resteraient essentiellement les mêmes, mais elles seraient basées sur UTC, au lieu de UT (ou GMT).

On peut se demander si le C.C.D.S. devrait fixer des tolérances pour l'écart entre les temps nationaux et légaux et l'échelle internationale définie par le B.I.H. (compte tenu de l'ajustement par un nombre entier d'heures). Que des tolérances soient fixées ou non, il reste à fixer comment les échelles nationales doivent être mises en accord avec UTC (BIH) quand des écarts deviennent appréciables. Les deux possibilités évidentes sont :

1) une petite altération de marche (et ainsi de la durée de la seconde "nationale") afin de faire dériver le temps jusqu'à l'accord ; 2) des sauts de temps qui peuvent être a) une série de très petits sauts non observables, sauf par les établissements horaires primaires, b) des sauts moins fréquents, par exemple de l'ordre de quelques millisecondes ou c) des corrections faites soit une fois par an, soit au moment de l'introduction d'une seconde intercalaire. Même s'il ne paraît pas opportun de faire une recommandation formelle, ces problèmes doivent être discutés et l'on doit noter le consensus d'opinions.

3.9. Le C.C.D.S. est concerné en premier lieu par la définition et l'établissement des échelles de temps atomique TAI et UTC. Les échelles de temps astronomiques UT (et leurs désignations plus précises UT₀, UT₁, UT₂) ainsi que TE (et l'utilisation de suffixes afin de préciser les différentes formes du TE) doivent être, d'une façon plus appropriée, discutées par les astronomes. Ces échelles de temps continuent à être considérées par l'U.A.I. Comme TAI fut choisi afin que la seconde soit conforme à celle du TE et que UTC est ajusté afin de

suivre approximativement UT, des définitions provisoires des échelles de temps astronomiques sont données en Annexe.

4. TERMINOLOGIE ET NOTATIONS

La désignation UTC est utilisée pour décrire un système de compromis où UT et TAI peuvent être tous deux obtenus par la même émission de signaux horaires et qui est basé sur la coordination internationale des signaux horaires radioélectriques recommandée par le C.C.I.R. (1963). Jusqu'en 1972, UTC a employé un décalage de fréquence combiné avec des sauts de temps dont l'amplitude fut finalement fixée à 0,1 s. Les inconvénients du décalage de fréquence et la prise de conscience que des sauts de temps de plus grande amplitude étaient acceptables (dans la mesure où des informations sur la différence UT1-UTC étaient diffusées) ont conduit à l'inauguration d'un nouveau système du UTC, le 1^{er} janvier 1972, sans décalage de fréquence et avec des sauts d'une seconde à des dates préférentielles. Quand on introduisit ces changements, on se demanda s'il fallait a) conserver le nom UTC ou b) adopter un nouveau nom pour le système modifié. Pour un certain nombre de raisons, certaines d'entre elles pouvant être considérées comme n'ayant plus de valeur, on a décidé en faveur de la nomenclature existante. Puisque le C.C.D.S. envisage d'étendre l'usage du UTC aux systèmes horaires civils et légaux, il convient de reconsidérer les arguments pour et contre un changement de nom et, en fait, de chercher à rationaliser la nomenclature des échelles de temps.

4.1. Il existe une aversion naturelle contre un changement de nomenclature, à moins qu'il ne soit justifié par de bonnes raisons. Le nom UTC est en usage depuis environ 10 ans et il est employé par tous les laboratoires horaires. Il est de plus en plus utilisé dans les publications horaires et les ouvrages de navigation ; il apparaît dans la littérature scientifique et les ouvrages généraux. On a exprimé l'opinion qu'il y a avantage à retenir l'expression du lien avec UT : pour la plupart des applications, UTC est une approximation convenable de UT et est utilisé comme tel. Le "C" a été introduit pour différencier le système des autres échelles UT et exprime que le système est recommandé pour être utilisé dans la coordination mondiale des émissions de signaux horaires.

La proposition de changer la désignation UTC est essentiellement basée sur les difficultés à craindre pour persuader le public d'accepter un sigle nouveau et technique. Si le système du UTC est destiné à former la base horaire civile, il devrait recevoir un nom plus simple et plus facile à comprendre. C'est un fait que, en dépit de plus de 10 ans d'emploi dans les milieux scientifiques, le terme UTC a délibérément été évité dans certaines publications officielles et que la notation plus compréhensible GMT a été maintenue. On peut noter en passant que GMT est généralement considéré comme l'équivalent de UT quand une exactitude de 1 s suffit. Quand une meilleure approximation est requise, on ne sait pas si GMT est l'équivalent de UT0, UT1 ou UT2. Comme dorénavant UTC peut s'écarter de presque 1 s de UT, il ne peut être considéré comme une approximation adéquate à UT dans des techniques telles que les levés géodésiques précis. L'utilisation de UTC pour désigner une échelle de temps à sauts qui peut s'écarter de près d'une seconde du temps solaire moyen est source de confusion et n'est pas désirable.

D'autre part, on rencontre moins d'opposition à retenir le nom TAI pour l'échelle de temps atomique du B.I.H., à la fois parce que cette échelle est presque exclusivement employée par des spécialistes et parce qu'elle a déjà subi divers changements de nom. Si, cependant, le nom UTC est changé, l'adoption d'une désignation plus simple mérite d'être considérée, dans l'intérêt de la rationalisation.

4.2. Il est possible d'accomplir une rationalisation et une simplification complètes des notations horaires comme suit :

TU = UT1 (BIH) = Temps universel (BIH)
TA = TAI (BIH) = Temps atomique international (BIH)
TI = UTC (BIH) = Temps international (BIH)
TE = Temps des éphémérides, avec le suffixe approprié
TZX = Temps du fuseau X
TL = Temps local

Ce système suit étroitement les conventions mathématiques. Il suit le précédent du C.C.D.S. en étant en accord avec le système de notations françaises recommandé à l'usage international dans la désignation TAI. Il peut aussi encourager l'utilisation des notations indépendantes du langage. Il a les avantages de la simplicité et de la brièveté. Ce dernier avantage est particulièrement important si des suffixes doivent être ajoutés pour dénoter des raffinements ou des sous-classes ou

encore si les codes des institutions sont indiqués entre parenthèses. Par exemple :

TU0 (PA) = UT0 déterminé à Paris
TA(G) = Temps atomique de Greenwich
TAH = Temps atomique héliocentrique
TL(D) = Temps local en Allemagne

Les différences entre échelles de temps peuvent être notées comme suit :

DTPQ = TP - TQ où P et Q représentent U, A, I, etc. et les différences sont toujours exprimées en secondes du SI. Cela suit étroitement la convention mathématique (DT indiquant une différence de temps) et retire toute ambiguïté possible tant pour les grandeurs dont on fait la différence que pour le sens.

On doit noter que TU0, TU1, TU2 continueront à être utilisés dans les institutions, mais, à moins que le contexte le rende évident, le sigle de l'institution sera toujours ajouté (par exemple TU0(PA) ou TU0(Paris)), car TU0 est particulier à l'observatoire ou l'instrument concerné et TU1, TU2 dérivent de TU0 par l'application de certaines corrections.

On préfère TA à TT (Temps terrestre) qui avait été suggéré pour remplacer TAI, car il fait apparaître la base essentielle de l'échelle du temps atomique et parce qu'il permet de futurs raffinements (tels que TAH pour dénoter le temps atomique héliocentrique) qui pourraient être requis.

L'utilisation de TI pour UTC fait apparaître la principale fonction de l'échelle, à savoir de procurer une référence pour l'usage international et une base à partir de laquelle les échelles nationales peuvent être définies. Le mot "international", avec des changements mineurs, est commun à toutes les langues et bien compris. TI sera probablement plus largement accepté que UTC et l'utilisation de GMT devrait diminuer, une alternative plus simple étant disponible.

La désignation TE suggérée pour le temps des éphémérides est strictement en dehors des attributions du Groupe de travail, mais elle pourrait néanmoins être recommandée pour considération par l'U.A.I. comme étant conforme aux notations des échelles dont le C.C.D.S. a la responsabilité.

4.3. La lettre Z pour dénoter le fuseau de Greenwich, les lettres A, B, C, ... et N, O, P, ... pour dénoter les fuseaux + 1 h, + 2 h, + 3 h, ... et - 1 h, - 2 h, - 3 h, ... sont déjà largement utilisées dans la défense nationale de beaucoup de

nations. La notation suggérée est en accord avec cette pratique répandue, mais elle est plus explicite.

La pratique présente peut conduire à des confusions étant donné les dates irrégulières de l'introduction d'une "heure d'été". En particulier, les horaires aériens qui portent la mention "heure locale" (local time) peuvent induire en erreur. Les statuts du B.I.H. excluent délibérément de fournir des renseignements sur les heures locales et les heures d'été des divers pays, car il n'est pas imposé aux administrations de notifier les changements qui, souvent, sont introduits avec un bref préavis. Une solution possible serait d'adopter la pratique suggérée ci-dessus. Par exemple, durant l'application de l'heure d'été au Royaume-Uni, les heures pourraient être notées A (et non Z).

L'expression "heure standard" (standard time) pour "heure du fuseau" (zone time) a été utilisée avec d'autres significations ; il est recommandé que l'usage de "heure standard" dans ce sens soit aboli.

La désignation TL pour temps local doit être préférée à TC "temps civil", car le suffixe C peut être pris à tort pour la représentation de "coordonné".

Si le système de notation décrit est adopté, il reste à résoudre quelques problèmes. Par exemple, si DTUI représente la valeur définitive de la différence TU-TI, comment désigner la valeur prévue approximative de DTUI (c'est-à-dire le DTUI présent) ? On pourrait aussi faire des objections au maintien de TI pour désigner l'échelle de temps international si l'on décide de remplacer UTC par TAI pour l'usage public général. Le C.C.D.S. devra décider si les avantages du système proposé l'emportent sur les inconvénients dus à des changements de la pratique courante.

4.4. L'échelle de temps atomique à sauts UTC, qui diffère de TAI par un nombre entier de secondes, devrait être utilisée pour noter les dates en minutes, heures, jours, mois, années, pour les usages publics. Cela satisferait l'exigence de la correspondance ($\pm 0,9$ s) avec le temps terrestre rotationnel UT1.

Il faudra admettre que lors de l'introduction d'une seconde intercalaire, le jour comprend 86 401 ou 86 399 secondes, mais le public est habitué au fait que l'année du calendrier comprend 366 jours les années bissextiles.

Ce dernier inconvénient a conduit les scientifiques et les astronomes à utiliser le système DJ et MJD ; par analogie, l'inconvénient des secondes intercalaires peut être surmonté par l'usage du comptage des secondes.

Comme on l'a rappelé, les dates en TAI ont déjà apparu dans la littérature. Le comptage de TAI en secondes, minutes et heures ne soulève pas de problèmes. Le fait que le nombre de jours du mois n'est pas constant et que le jour et l'année sont incommensurables a conduit au calendrier actuel qui est compliqué. Des complications encore plus grandes surviendraient si l'on tentait d'introduire, pour l'usage général, un système de calendrier complet basé sur la seconde atomique. La mise en oeuvre, depuis longtemps réclamée, d'un calendrier réformé diminuerait l'inconvénient des inégalités présentes des mois, mais il resterait les problèmes des jours intercalaires et de l'incommensurabilité du jour et de l'année. En dépit de l'attrait d'une désignation concise de la date du calendrier, dans l'échelle TAI, cela est impraticable à cause de la complexité du calendrier et des dangers de confusion.

Le but essentiel du TAI est de fournir une échelle de temps uniforme dans des domaines scientifiques spécialisés et une base pour l'échelle UTC. Pour la première application, la forme d'expression des dates la plus convenable est le comptage continu des secondes ou des jours, suivant le cas. On recommande donc que le C.C.D.S. considère l'introduction d'un comptage continu des secondes du TAI, l'échelle ainsi obtenue étant désignée par SA (secondes atomiques). Pour des raisons d'homogénéité, on suggère que l'échelle réalisée par le comptage continu des jours soit désignée par JA (jours atomiques).

Si l'on décide qu'il ne doit pas être introduit de notation "calendariale" du TAI, il n'est pas utile de définir une notation spéciale pour le comptage des secondes : TA se rapporterait à ce comptage, JA au comptage des jours.

On ne rencontre pas d'objection à l'utilisation des dates calendariales pour UTC - en fait tout changement se heurterait probablement à une large opposition. Il est évidemment avantageux de se conformer au système de l'ISO pour la désignation numérique des dates (ISO R 2014 - 1971) ; par exemple, le 9 juillet 1974 s'écrirait :

1974 07 09

74-07-09

74 07 09

Ce système a l'avantage d'être indépendant des langages et des machines. En passant, il faut noter que la désignation recommandée de l'heure (ISO R31 part 1) telle que :

$$21^h 27^m 13^s$$

a l'inconvénient d'utiliser des lettres en exposant, ce qui gêne pour la dactylographie et n'est pas reproductible en mécanique.

5. RÉSUMÉ

Après considération des informations soumises par les membres du Groupe de travail et à la lumière d'autres considérations, les propositions suivantes sont offertes comme base aux discussions.

- (1) Le saut proposé de 32 s ne devrait pas être appliqué à l'échelle de temps atomique TAI.
- (2) Les dates en TAI devraient être exprimées par un comptage spécifié des secondes ou un comptage des jours.
- (3) L'opportunité d'un changement de nom du UTC doit être examinée.
- (4) UTC devrait être adopté comme base des échelles de temps nationales et des dates du calendrier.
- (5) L'adoption d'un système rationnel et homogène pour la désignation des échelles de temps doit être examinée.

(24 mai 1974)

ANNEXES AU RAPPORT DU PRÉSIDENT
DU GROUPE DE TRAVAIL SUR LES ÉCHELLES DE TEMPS

Les Annexes 1, 2 et 3 rappellent respectivement : la résolution de la Commission I de l'U.R.S.I. (1972), les résolutions conjointes des Commissions 4 et 31 de l'U.A.I. (1973), le projet d'Avis 460 établi par la réunion intérimaire du Groupe d'Etudes 7 du C.C.I.R. (1974)*.

L'Annexe 4 est la suivante :

Échelles de temps astronomiques

UT (temps universel) est la désignation générale de UT₀, UT₁, UT₂ quand une approximation à moins d'une seconde n'est pas souhaitée.

UT₀ est une mesure de la position angulaire de la Terre autour de son axe géographique ; c'est l'échelle de temps, particulière à chaque observateur, déduite de l'observation de l'angle horaire des étoiles, après application d'une correction pour la longitude géographique (voir Note).

UT₁ (temps universel 1) est l'échelle de temps basée sur la rotation de la Terre. C'est une mesure de la position angulaire autour de l'axe instantané de rotation (voir Note).

Note. UT₁ est déduit de UT₀ par l'application de corrections qui tiennent compte des positions différentes de l'observateur par rapport à un axe conventionnel (proche de l'axe géographique) et par rapport à l'axe instantané de rotation. Ce dernier n'est pas fixe par rapport à la Terre ; son mouvement se déduit de l'analyse des observations. Il en résulte que sa position moyenne n'est pas exactement l'axe géographique. Les mesures de UT₁ déduites des observations faites en différentes stations doivent être compatibles.

UT₂ est UT₁ corrigé par une représentation conventionnelle de l'irrégularité saisonnière de la rotation terrestre.

UTC (temps universel coordonné) est une approximation à UT₁ déduite du TAI par un procédé agréé.

* Ce projet d'Avis, qui figure également dans le document CCDS/74-7, a été entériné par la XIII^e Assemblée Plénière du C.C.I.R. (Genève, 1974).

TE (temps des éphémérides) est l'échelle de temps basée sur le mouvement orbital de la Terre autour du Soleil.

TE_i est une échelle de temps utilisée comme représentation pratique de TE. Le suffixe _i spécifie le procédé utilisé pour obtenir TE_i, par exemple :

TE₂ est l'échelle déduite de l'utilisation de l'éphéméride lunaire actuellement adoptée.

ANNEXE S 7

Contribution pour la 7^e session du C.C.D.S.

Par G. BECKER

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Rép. Féd. d'Allemagne)

(Traduction du Document CCDS/74-9)

I. PROPOSITIONS POUR LES ACTIVITÉS DU C.C.D.S.

I.1 Recommandation pour l'utilisation du TUC comme base du temps des fuseaux.

I.2 Recommandation pour donner au TUC le nom de "Temps international" TI.

I.3 Résolution du problème concernant le décalage de 32 s de l'origine du TAI.

I.4 Choix du nom futur du TAI.

I.5 Le problème des dates dans le TAI.

I.6 Annulation de l'écart de fréquence du TAI par rapport à la fréquence nominale et choix de la date pour l'introduction de cette correction.

I.7 Recommandation de symboles unifiés (à utiliser dans toutes les langues) pour les échelles de temps utilisées en métrologie.

I.8 Recommandation pour qu'une plus grande activité soit consacrée à la mise au point d'étalons primaires afin d'améliorer l'exactitude et la stabilité à long terme du TAI.

I.9 Déclaration du C.C.D.S. selon laquelle, indépen-

damment d'une éventuelle nouvelle définition du mètre, la définition de la seconde doit être maintenue inchangée.

II. COMMENTAIRES SUR LES PROBLÈMES SOULEVÉS AU PARAGRAPHE I.

Les opinions exprimées ci-après tiennent compte des discussions du Groupe de travail du C.C.D.S. sur les Echelles de Temps.

I.1 Recommandation pour l'utilisation de TUC

Il est exact que TUC est déjà employé partout et que dans un certain nombre de cas il n'existe aucune contradiction avec les lois nationales. Néanmoins, une recommandation de la C.G.P.M. est souhaitable. — En 1967, la seconde atomique était d'un emploi général, mais une définition fut toutefois donnée ; le TAI de 1971 a été défini bien que TA(BIH) fût déjà d'un emploi général et en accord avec les lois nationales. — Ce n'est que par le moyen de TUC que la seconde et le temps atomique international TAI sont accessibles au public.

Faut-il recommander l'échelle de temps TUC ou le système TUC ? Le système comporte l'information de DTU1. Seule l'échelle de temps a une importance métrologique (et légale). En conséquence l'échelle de temps TUC devrait être recommandée comme base du temps des fuseaux horaires.

Un projet de recommandation portant sur les points I.1 et I.2 est joint (1^{ère} annexe).

I.2 Temps international

Si le TUC devenait officiellement la base du temps des fuseaux horaires et remplaçait ainsi TU, il serait judicieux de l'appeler Temps International TI et il semble que l'occasion pour le faire soit favorable.

I.3 Modification du TAI de 32 s

Si un changement de 32 s dans TAI est nécessaire, un décalage complet de TAI de 32 s apparaît plus raisonnable qu'un saut de 32 s. Dans le cas où de fortes raisons seraient présentées pour un changement, la P.T.B. serait d'accord pour un décalage de 32 s si celui-ci doit rester le *seul changement* à venir. On suppose que toutes les adaptations futures au TAI des équations astronomiques des mouvements des corps célestes seront effectuées en modifiant les constantes dans ces équations.

I.4 Nom futur du TAI

On ne pense pas que le risque d'une confusion avec le "Temps International" constitue un problème sérieux : pour les spécialistes il n'y a pas de problème, et pour les non-spécialistes TAI ne présente pratiquement aucun intérêt.

Si toutefois on pensait qu'il y a un sérieux danger de confusion, on pourrait accepter les noms ci-après :

TA	Temps atomique
TAC	Temps atomique conventionnel
TS	Temps scientifique
TT	Temps terrestre.

Nous ne pouvons donner notre accord à la désignation TE, temps des éphémérides, au lieu de TAI. De même, on ne peut accepter deux noms différents pour la même échelle (par exemple TAI et TE).

Décaler TAI de 32 s serait une bonne occasion de changer et d'améliorer le nom, en évitant ainsi la confusion entre TAI (nouveau) et TAI (ancien).

Le C.C.D.S. ne doit pas discuter de problèmes astronomiques (par exemple d'éventuels nouveaux concepts de TE). Mais les astronomes participant au C.C.D.S. devraient avoir une opinion unique sur le décalage de TAI ou son maintien tel quel. Si les astronomes ne sont pas parvenus à un accord sur ce point, le changement devrait être différé, jusqu'à ce que la question soit clarifiée.

I.5 Datation dans le TAI

Une déclaration suffirait peut-être pour dire que les dates dans le TAI (et le TUC) peuvent être exprimées dans tous les systèmes existants de calendrier, si la référence au TAI (ou au TUC) est bien nette. En ce qui concerne le calendrier grégorien (actuel), il existe déjà des recommandations internationales (de l'I.S.O.) sur la façon d'exprimer les dates.

Le C.C.I.R. a adopté une nouvelle version de la recommandation 7/457 selon laquelle l'emploi de la date julienne modifiée MJD n'est plus limité à TU.

Un projet de recommandation plus détaillé est joint (2^e annexe).

I.6 Écart de fréquence du TAI

On propose que la fréquence du TAI soit diminuée d'exac-

tement $10,0 \times 10^{-13}$ ou de $0,1 \mu\text{s}$ par jour. Les résultats des mesures de la fréquence du TAI faites par la P.T.B. sont en accord à la fois avec ces deux rectifications.

Comme il faudra modifier les fréquences des TUC(i) et celles des émetteurs de fréquences étalons et de signaux horaires, un saut de fréquence devrait être annoncé au moins quatre mois à l'avance. La P.T.B. serait d'accord pour que la modification soit faite à la fin de 1974.

I.7 Symboles unifiés

Le C.C.D.S. doit se limiter aux problèmes des échelles de temps utilisées en métrologie. Outre TAI, ce sont :

TA	Temps atomique
TUC	Temps universel coordonné.

La lettre T comme premier symbole est préférable : les symboles sont utilisés comme grandeurs pour exprimer des dates dans une échelle de temps (façon mathématique d'écrire les symboles). La position de T n'est pas une question de langue mais de commodité. (Le symbole UTC n'est certainement pas en accord avec les règles de la langue anglaise). Si nécessaire, les termes auxquels les symboles se rapportent doivent être donnés en latin sans traduction officielle en anglais ni en français.

I.8 Activité sur les étalons primaires

Comme déjà souligné [1], la stabilité à long terme du TAI ne peut être atteinte en utilisant seulement des horloges commerciales. Des étalons primaires sont essentiels pour l'exactitude et la stabilité à long terme des échelles de temps.

I.9 Nouvelle définition du mètre

Si l'on pense qu'une nouvelle définition du mètre devrait être fondée sur la transition hyperfine de ^{133}Cs , cela ne devrait avoir aucune conséquence sur la définition de la seconde. Il n'y a aucune raison de changer la définition de la seconde dans un avenir prévisible.

III. ACTIVITÉ DE LA P.T.B. DANS LE DOMAINE DES ÉTALONS DE TEMPS ET DE FRÉQUENCE

III.1 Étalons primaires

Le tableau ci-après donne la liste des paramètres qui contribuent à l'incertitude intrinsèque (exactitude) de

l'étalon primaire Cs1 dans le cas de la méthode du renversement du jet en utilisant des atomes lents (≈ 127 m/s) et des atomes rapides (≈ 240 m/s).

*Incertitude relative de Cs1
avec la méthode de renversement du jet
(Durée des mesures : 2 semaines)*

Paramètre	Incertitude sur la fréquence	
	atomes lents	atomes rapides
Différence de phase		
changement		
d'étalons de référence	17×10^{-15}	17×10^{-15}
de vitesse du jet	1×10^{-15}	1×10^{-15}
de différence de phase	10×10^{-15}	20×10^{-15}
de position du faisceau	10×10^{-15}	25×10^{-15}
Effet Doppler relativiste	3×10^{-15}	10×10^{-15}
Désaccord du résonateur	1×10^{-15}	4×10^{-15}
Intensité du champ magné-		
tique	13×10^{-15}	13×10^{-15}
Inhomogénéité du champ		
magnétique	3×10^{-15}	3×10^{-15}
Bandes latérales haute		
fréquence (50 Hz)	4×10^{-15}	7×10^{-15}
Transitions voisines	1×10^{-15}	7×10^{-15}
Démodulation	2×10^{-15}	2×10^{-15}
Total des effets connus	26×10^{-15}	41×10^{-15}
Incertitude de Cs1	$1,5 \times 10^{-13}$	

L'exactitude obtenue avec les atomes lents a déjà été publiée [2]. Etant donné que la dispersion relative des vitesses dans le jet est relativement petite (25 % pour les atomes lents et 40 % pour les atomes rapides), les incertitudes dues aux effets Doppler du premier ordre et du second ordre sont comparativement faibles. Kramer a effectué [3] une évaluation des vitesses effectives pour la détermination des effets Doppler du premier et du second ordre sur la base d'une analyse de Fourier de la résonance de Cs.

Le renversement du jet est réalisé en intervertissant (sous vide) le four et la chambre du détecteur de façon à maintenir les caractéristiques du jet égales pour ses deux directions. Dans les limites d'erreur, les résultats de la méthode des deux vitesses concordent avec ceux de la méthode du renversement du jet.

L'incertitude intrinsèque relative de $1,5 \times 10^{-13}$ pour CS1 donnée le tableau est considérée comme une valeur prudente.

Par manque de personnel on n'a que peu progressé dans la mise au point de l'étalon primaire CS2 à double jet.

III.2 Maser à hydrogène

On a modifié l'un des deux masers à hydrogène de la P.T.B. (H2) de façon à améliorer son aptitude à jouer le rôle de référence pour l'étalon primaire CS1 et lui permettre de contribuer comme étalon secondaire à l'élaboration de TA(PTB) et de TAI. Pour ce dernier usage, on a mis au point une méthode précise d'accord du résonateur. Nous ne sommes pas encore certains que H2 a atteint la stabilité nécessaire pour qu'il soit en mesure de contribuer aux échelles de temps.

III.3 Horloges commerciales à césium

Selon les informations obtenues du B.I.H., les horloges commerciales de la P.T.B. qui contribuent à TAI ont été affectées du poids le plus élevé par horloge.

III.4 Lasers stabilisés sur le méthane

On a construit à la P.T.B. des lasers stabilisés sur le méthane en vue de comparaisons de longueurs d'onde et de fréquences. Les appareils réalisés présentent la grande stabilité à court terme habituelle. Toutefois, on estime que la reproductibilité de la fréquence stabilisée sur le minimum d'absorption n'est que de 10^{-11} et l'incertitude intrinsèque 10^{-10} si l'on considère que deux lasers stabilisés de conception identique présentent une différence relative de fréquence d'environ 10^{-10} .

La structure hyperfine de la raie du méthane P7, v3, qui donne une fréquence centrale apparente qui dépend de la puissance dans le cas d'une faible résolution spectrale, n'est pas la seule limite à la stabilité de la fréquence des lasers à He-Ne stabilisés sur le méthane. Une stabilisation sur le maximum de la dérivée seconde n'élimine pas la différence de fréquence entre les deux appareils. Le fait que la fréquence

stabilisée dépende de la largeur de modulation fait ressortir une asymétrie relativement forte de la raie d'absorption que l'on considère comme liée à la dispersion saturée.

L'effet de cette asymétrie peut être éliminé dans une large mesure en stabilisant au moyen de la dispersion saturée [4]. Dans ce cas, la reproductibilité est évaluée à 10^{-12} et l'incertitude intrinsèque à 10^{-11} . De cette façon, de nouvelles améliorations sont possibles; toutefois, elles ne sont utiles que dans le cas de la stabilisation sur une raie sans structure.

BIBLIOGRAPHIE

1. BECKER (G.), Zum Problem künftiger Zeitskalen, *PTE-Mitt.*, 79, 1969, p. 441.
2. BECKER (G.), Das Nationale Zeitnormal, *Kleinkeubacher Berichte*, 17, 1974, p. 81.
BECKER (G.), Eigenschaften des Zeit- und Frequenznormals CSI der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt und Frequenzvergleiche von 1969 bis 1973, *P.T.B.-Jahresbericht*, 1973, p. 133.
3. KRAMER (G.), Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung des Cs-Atomstrahles im Frequenznormal CSI mittels Fourieranalyse der Resonanzkurve, *P.T.B.-Jahresbericht*, 1973, p. 134.
4. KRAMER (G.), HELMCKE (J.) and WEISS (C.O.), *Verhandlungen PFG (VI)*, 9, 1974, p. 526.

(31 mai 1974)

1^{ère} Annexe au Document CCDS/74-9

PROJET DE RECOMMANDATION :

LE TUC COMME BASE DES HEURES DES FUSEAUX

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

Considérant

1. le besoin d'une échelle mondiale de temps coordonné fondée sur la seconde du SI, dont seraient déduites les heures des fuseaux,
2. que la meilleure désignation d'une telle échelle de temps serait "Temps International" TI,
3. que des organisations internationales compétentes (U.R.S.I. en 1969 et 1972, C.C.I.R. en 1970) ont demandé au C.I.P.M./C.G.P.M. de définir une échelle de temps destinée à être utilisée dans les pays adhérents à la Convention du Mètre,
4. que la diffusion d'une pure échelle de temps atomique ne semble pas actuellement adéquate pour éviter la confusion avec le Temps Universel nécessaire pour la navigation,
5. que le C.C.I.R. a mis au point, pour les "émissions de fréquences étalons et de signaux horaires" des services spécialisés, le "Temps Universel Coordonné" TUC qui est en relation étroite avec le Temps Atomique International,
6. que les heures des fuseaux fondées sur le TUC comme Temps International rendraient TAI et TU partout disponibles,

recommande

1. que l'échelle de temps dont les heures des fuseaux et les heures en relation avec elles seraient déduites soit nommée "Temps International" TI,
2. que, jusqu'à nouvel ordre, le Temps Universel Coordonné tel qu'il est élaboré par le Bureau International de l'Heure à partir du Temps Atomique International soit choisi comme Temps International TI,
3. que le Temps International remplace complètement le Temps Universel et le Temps Moyen de Greenwich pour la formation des heures des fuseaux et des heures qui leur sont liées,
4. que les dénominations des heures des fuseaux et des heures qui leur sont liées restent inchangées,
5. que les échelles de temps valables dans les pays adhérents à la Convention du Mètre soient en accord aussi étroit que possible avec les heures des fuseaux correspondantes et les heures qui leur sont liées, heures fondées sur le Temps International TI,
6. que cette recommandation soit communiquée au C.C.I.R., à l'U.A.I., à l'U.R.S.I., à l'U.G.G.I., à l'I.M.C.O. et à l'I.S.O.

2^e Annexe au Document CCDS/74-9

PROJET DE RECOMMANDATION :
DATATION DANS L'ÉCHELLE DE TAI ; ORIGINE

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

Considérant

1. que la datation des événements dans le TAI nécessite d'établir les règles de formation et de désignation de multiples de la seconde du TAI,
2. qu'il est désirable d'appliquer de la même façon à TAI les systèmes de calendriers qui sont déjà employés pour les autres échelles de temps,
3. que l'Organisation Internationale de Normalisation (I.S.O.) a recommandé la forme de datation du calendrier grégorien,
4. que l'on doit éviter au moyen de désignations appropriées toute confusion entre la datation dans le TAI et la datation dans d'autres échelles de temps existantes,

recommande

1. qu'à partir de l'origine du TAI (qui est proche de 1958-01-01, 0 h 0 m 0 s TU2), on forme les multiples suivants de la seconde de TAI : minutes de TAI, heures de TAI et jours de calendrier de TAI,
2. que les jours de calendrier de TAI et leurs multiples (mois et années de calendrier) soient formés et désignés selon les règles du calendrier grégorien,
3. que l'expression de la date d'un événement dans le calendrier grégorien de TAI soit de préférence en accord avec les recommandations de l'Organisation Internationale de Normalisation,
4. que les multiples des jours de calendrier de TAI soient aussi formés et désignés en accord avec les règles de décompte décimal des jours établies pour la "Date Julienne" et la "Date Julienne Modifiée" (C.C.I.R. Comm. d'Etudes 7, Rec. 457, 1974), et que l'heure du jour de TAI puisse être ajoutée, exprimée en heures, minutes et secondes ou bien comme une fraction décimale du jour de calendrier de TAI,
5. qu'une date de TAI soit caractérisée par l'addition des symboles spécifiques TAI, JD/TAI ou MJD/TAI, respectivement, ou par l'utilisation de ces symboles comme symboles de la date,
6. que cette recommandation soit communiquée pour information à l'I.S.O., au C.C.I.R., à l'U.A.I. et à l'U.G.G.I.

ANNEXE S 8

Contribution du N.R.C. (Canada) pour la 7^e session du C.C.D.S.

(Traduction du Document CCDS/74-10)

I. PROGRÈS DES ÉTALONS ATOMIQUES DE FRÉQUENCE ET DES HORLOGES ATOMIQUES

A. Étalons de temps et de fréquence à jet de césium

Au N.R.C., les travaux sur les étalons primaires de temps et de fréquence à jet de césium ont au premier chef porté sur l'achèvement du nouvel étalon Cs V de 2,1 m. L'étalon existant, Cs III, a fonctionné de façon courante, sans aucune modification, pour des étalonnages bi-hebdomadaires, de durée six heures, de l'ensemble d'horloges du N.R.C. utilisé pour la réalisation physique de UTC(NRC) et TA(NRC).

Au cours de 1972, on a assemblé les circuits électroniques prototypes nécessaires aux essais de Cs V comme étalon de fréquence et, au début de 1973, on a procédé à une évaluation préliminaire du fonctionnement de cet étalon [1]. Les résultats ont montré que, pour l'amélioration de l'exactitude et de la stabilité par rapport à Cs III, on avait atteint l'ordre de grandeur désiré. On a pu obtenir une stabilité d'environ 1×10^{-13} sur une durée d'environ 120 s et on a estimé que l'exactitude était comprise entre 1 et 2×10^{-13} . On a toutefois connu des difficultés notables avec des déplacements de fréquence dépendant de la puissance d'excitation, appa-

remment dues à un défaut de pureté spectrale dans le signal d'excitation.

Pendant la fin de 1973 et le début de 1974, les travaux ont eu pour but la résolution du problème de pureté spectrale, la construction d'un nouvel équipement électronique et la transformation de Cs V de façon qu'il fonctionne comme étalon primaire de temps. Le premier de ces problèmes, la pureté spectrale, n'a pas encore été résolu de façon satisfaisante mais les essais actuels pour surmonter ces difficultés paraissent prometteurs. On a maintenant achevé tous les autres composants électroniques et, hormis le déplacement de fréquence en fonction de la puissance, actuellement inacceptable (environ 2×10^{-13}), le fonctionnement de l'horloge sur des batteries fournissant toute la puissance nécessaire s'est révélé tout à fait satisfaisant. Des mesures sur des durées prolongées ont montré que la constance du champ C est telle que les variations de fréquence de l'horloge résultant des variations de ce champ peuvent être maintenues inférieures à 1×10^{-14} . Des mesures semblables avec Cs III ont montré que des altérations dans les blindages magnétiques pouvaient entraîner des modifications inattendues de fréquence de plusieurs 10^{-13} . Ce n'est pas le cas pour Cs V.

Des comparaisons de fréquence de Cs III et Cs V, effectuées en avril et mai 1974, pendant les étalonnages de l'ensemble de l'horloge Cs III, deux fois par semaine pendant 6 heures, ont montré que la différence de fréquence entre ces deux étalons est restée pratiquement la même que ce qu'elle était au cours de la période d'évaluation préliminaire, 14 mois plus tôt, dans les limites de la précision des mesures. La précision est déterminée essentiellement par la stabilité de Cs III, le système de comparaison de phase utilisé, la durée de mesure (6 heures) et la variabilité du déplacement de fréquence en fonction de la puissance pour Cs V. Le rapport de fréquence observé était $f_{\text{CsIII}}/f_{\text{CsV}} = 1 + 1,10 \times 10^{-12}$ (moyenne de 15 mesures), avec un écart-type d'une mesure de $2,3 \times 10^{-13}$ et une incertitude de la moyenne estimée à 6×10^{-14} (1σ). Cette dernière valeur est toutefois sujette à caution à cause de la variabilité du déplacement de fréquence en fonction de la puissance pour Cs V. La valeur de $f_{\text{CsIII}}/f_{\text{CsV}}$, obtenue au cours de la précédente comparaison en 1973, était de $1 + 1,05 \times 10^{-12}$. On en déduit qu'aucune modification significative des fréquences relatives de Cs III et Cs V n'est intervenue depuis les mesures

précédentes.

B. Échelles de temps

Les deux échelles de temps du N.R.C., UTC(NRC) et TA(NRC), continuent à être fondées exclusivement sur Cs III. Aucun pilotage de la fréquence n'est employé pour maintenir UTC(NRC) en accord avec UTC(BIH), bien que la différence entre ces deux échelles n'ait pas dépassé 2 μ s depuis le début de 1972.

En 1973 et au début de 1974, des comparaisons au moyen du Loran C et de la télévision ont montré un changement de marche apparent d'une importance inquiétante de UTC(NRC) par rapport à UTC(BIH), correspondant à un décalage de UTC(NRC) de 3,5 μ s environ. Des comparaisons internes d'horloges ont montré qu'un tel décalage de UTC(NRC) était improbable et que des modifications dans les durées de propagation, tant pour les émissions de télévision que pour celles du Loran C, peuvent entraîner des erreurs de l'ordre de 2 ou 3 μ s dans les comparaisons d'échelles de temps [2].

C. Effet Doppler du second ordre

On a mis au point une méthode [3] pour calculer l'effet Doppler du second ordre dans un étalon de fréquence à jet de césium, en utilisant une transformée de Fourier du diagramme de Ramsey. Cette nouvelle méthode ne nécessite pas le calcul de la distribution des vitesses préalablement au calcul de la correction qu'il faut en attendre, mais, à la place, on calcule directement une fonction que l'on utilise dans une seconde transformée de Fourier pour obtenir la correction pour l'effet Doppler du second ordre et la correction pour la différence de phase dans la cavité. Une détermination des directions des deux jets donne alors une détermination exacte du déplacement de fréquence dû à la différence de phase dans la cavité et à l'effet Doppler du second ordre.

On peut appliquer la méthode à une excitation radiofréquence modulée en fréquence bien que dans ce cas on utilise une approximation pour établir les expressions donnant les déplacements de fréquence. La distribution des vitesses a également été déduite de la courbe de résonance statique, avec un résultat conforme à ce qu'on pouvait attendre d'après l'optique du faisceau.

Des travaux en liaison avec l'Université de Paris et portant sur une nouvelle technique pour calculer, dans les étalons de fréquence à jet de césium, les déplacements de

fréquence dus à l'effet Doppler du second ordre et à la différence de phase dans la cavité, ont aussi été entrepris en 1973 et 1974. La méthode [4] utilise une approximation par un développement en série de la moitié centrale du pic principal de la courbe de résonance de Ramsey. L'approximation n'est valable que pour les étalons de fréquence à jet long pour lesquels l'espacement entre les régions d'interaction des micro-ondes est d'environ deux ordres de grandeur supérieur à la longueur de chaque région.

L'asymétrie de la résonance qui provient de la combinaison de l'effet Doppler du second ordre et de la distribution des vitesses caractéristique du jet atomique de césium, découverte antérieurement par une analyse par ordinateur pour les étalons du N.R.C. Cs III et Cs V, est démontrée analytiquement par cette nouvelle méthode.

L'application de cette méthode à Cs III et Cs V a révélé que les valeurs de l'effet Doppler du second ordre concordent à ± 3 MHz avec celles calculées par la méthode antérieure. Malheureusement, le manque de précision dans la détermination de la forme de la raie de résonance pour les deux étalons rendait impossible la vérification de l'asymétrie de la raie par cette méthode.

L'application à la détermination de la différence de phase dans la cavité suppose l'absence de décalages en fonction de la puissance, liés à la pureté spectrale du signal micro-onde d'excitation. La vérification expérimentale de cet aspect de la technique sera tentée lorsque seront résolus les problèmes liés aux impuretés spectrales dans le signal d'excitation de Cs V.

D. Masers à hydrogène

Au cours des deux dernières années, au N.R.C. les travaux sur les deux masers à hydrogène H1 et H2 ont eu essentiellement pour but l'amélioration de leur stabilité à long terme, c'est-à-dire sur des durées supérieures à 1 heure. Pour des échantillons de durée environ 1000 secondes, on a pu obtenir entre les deux masers pour valeurs de l'écart-type d'Allan $\sigma = 4$ à 5×10^{-15} , mais la stabilité décroît pour des échantillons de durée supérieure.

On a obtenu quelques améliorations du fonctionnement en réduisant les sources de chaleur et les fluctuations du champ magnétique au voisinage des masers. L'utilisation exclusive de composants à l'état solide dans les systèmes électroniques des

masers a apporté beaucoup d'aide à cet égard.

La source la plus importante de variation de fréquence dans les masers provient des changements de dimensions dans la cavité résonante et dans la région du ballon de stockage. Une étude théorique de la cavité résonante chargée avec le ballon de stockage a donné des informations utiles sur l'effet de la température sur la fréquence de résonance de la cavité. On a découvert qu'un effet important, ultérieurement confirmé par l'expérience, était dû à la variation de la constante diélectrique du ballon avec la température. On a trouvé que l'effet d'un ballon de stockage en quartz, de 16 cm de diamètre et de 1 mm d'épaisseur de paroi, était d'environ $- 800 \text{ Hz}/^{\circ}\text{C}$. On peut réduire cet effet en utilisant des ballons à paroi plus mince.

Les masers du N.R.C. comportent des cavités cylindriques en silice fondue avec des armatures en aluminium. Les cavités ont d'assez bons coefficients statiques de variation de fréquence en fonction de la température (environ $300 \text{ Hz}/^{\circ}\text{C}$), mais leur fonctionnement en présence de gradients de température n'est pas aussi bon que prévu. On a fait des modifications pour réduire la capacité thermique du montage de l'armature supérieure de la cavité. Il s'ensuit que l'on atteint maintenant plus rapidement l'équilibre thermique de la cavité.

On a maintenant l'impression que les variations de fréquence qui surviennent résultent davantage d'instabilités mécaniques que des effets de petites variations de température. Pour améliorer la stabilité mécanique, on a apporté au dessin de la cavité plusieurs modifications dont l'utilisation d'un mécanisme de verrouillage à ressort. Depuis que l'on a apporté ces modifications, les variations de fréquence des masers tendent à présenter des dérives lentes et monotones. Ce comportement peut résulter d'un lent fluage des matériaux utilisés dans la cavité.

On a maintenant presque achevé la construction d'un dispositif automatique d'accord des masers. Il est conçu pour accorder H1 en utilisant H2 comme référence puis pour accorder H2 en utilisant H1 comme référence. Quand ce dispositif automatique fonctionnera, on envisage d'étudier la fréquence fournie par les masers accordés pour différents réglages du champ magnétique. D'autres chercheurs ont découvert que la fréquence d'un maser accordé extrapolée au champ magnétique zéro varie avec le champ magnétique utilisé. Il est important de mesurer cet effet pour les masers du N.R.C.

En 1973, la différence entre les effets de paroi des ballons de stockage pour les masers H1 et H2 a été à nouveau mesurée. Elle avait auparavant été soigneusement mesurée en 1970-71. La différence d'effet de paroi semblait avoir changé de $(1,9 \pm 1,4) \times 10^{-13}$ depuis 1970-71.

II. L'ÉCHELLE DE TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL, TAI

Il n'y a aucune objection à la proposition contenue dans la Résolution N° 2 de l'U.A.I. (CCDS/74-1) d'introduire un saut de 32 secondes dans l'échelle de TAI.

III. EXACTITUDE DE L'INTERVALLE UNITAIRE DE LA SECONDE DU TAI

Les progrès les plus récents dans les étalons primaires de fréquence à jet de césium à la P.T.B., au N.B.S. et au N.R.C. ont montré que la marche actuelle du TAI est d'environ 1×10^{-12} trop rapide. Afin que TAI soit caractérisé non seulement par l'uniformité mais également par l'exactitude, il conviendrait d'envisager une révision de la marche du TAI, qui tienne compte de ces récentes évaluations. On propose qu'à 0 h 0 m 0 s, le 1^{er} janvier 1975, on diminue la marche du TAI d'exactly 1×10^{-12} .

IV. HEURE LÉGALE ET LÉGISLATION DE L'HEURE

Actuellement, le problème de l'heure légale est un sujet de très grand intérêt au Canada. La mise en oeuvre des recommandations par toute administration a des conséquences légales immédiates qui en font un point important de discussion au C.C.D.S.

Au Canada il y a 13 administrations indépendantes (1 fédérale, 10 provinciales, 2 territoriales) qui s'occupent des lois concernant l'heure et cela ne peut être unifié dans notre constitution. Les lois actuelles sont chaotiques et toutes se rapportent à une forme ou une autre de "l'heure de Greenwich". Aucune de ces formes n'est actuellement acceptable juridiquement et la suggestion de les remplacer par le "Temps Universel Coordonné" rencontre une forte résistance ou même une franche opposition. Les législateurs et l'Administration considèrent que ce terme est du jargon scientifique et ne convient pas pour l'usage législatif ou public.

C'est la raison pour laquelle nous avons plaidé dans les discussions de l'U.A.I. et du C.C.I.R. pour que "Temps Universel Coordonné" soit remplacé par "Temps International". Comme les arguments à l'appui de ce point de vue ont été communiqués au Groupe de travail du C.C.D.S., nous pensons que ce sujet sera discuté à la réunion du C.C.D.S.

Le Gouvernement fédéral s'efforce d'assurer l'uniformité des lois qui régissent l'"heure normale" et l'"heure d'été" en formant un comité comprenant des représentants des administrations fédérale, provinciales et territoriales. On espère que ce comité parviendra à faire des recommandations acceptables par toutes les autorités canadiennes. Il est possible qu'une formule comme "L'heure normale orientale sera de cinq heures en retard sur le temps international (autrefois Temps Moyen de Greenwich et maintenant appelé Temps Universel Coordonné)" soit acceptée. Toutefois, si les autorités canadiennes décident que le temps international doit être officiellement appelé "Temps International", cela constituera une définition unilatérale dans la loi canadienne à l'usage du Canada.

BIBLIOGRAPHIE

1. MUNGALL (A.G.), BAILEY (R.), DAAMS (H.), MORRIS (D.) and COSTAIN (C.C.), The new NRC 2.1 metre primary cesium frequency standard, Cs V, *Metrologia*, 9, N° 3, 1973, pp. 113-127.
2. MUNGALL (A.G.), Anomalies in determinations of time scale uniformity based on TV and Loran C comparisons, *Metrologia*, 10, N° 3, 1974, pp. 105-114.
3. DAAMS (H.), Corrections for second-order Doppler shift and cavity phase error in cesium atomic beam frequency standards, 1974 Conference on Precision Electromagnetic Measurements, *IEEE Trans. on Instr. and Meas.*, IM-23, N° 4, 1974, pp. 509-514.
4. AUDOIN (C.), LESAGE (P.) and MUNGALL (A.G.), Second-order Doppler and cavity phase dependent frequency shifts in atomic beam frequency standards, 1974 Conference on Precision Electromagnetic Measurements, *IEEE Trans. on Instr. and Meas.*, IM-23, N° 4, 1974, pp. 501-508.

(10 juin 1974)

ANNEXE S 9

Contribution du N.B.S. (États-Unis d'Amérique) pour la 7^e session du C.C.D.S.

(Traduction du Document CCDS/74-11)

ÉTAT ACTUEL DES ÉTALONS PRIMAIRES DU N.B.S.

Situation générale

Le National Bureau of Standards, Boulder, Colorado, possède deux étalons primaires pour la fréquence et l'unité de temps. Ce sont NBS-4 et NBS-5. NBS-4 a commencé à fonctionner en août 1973, NBS-5 fonctionne déjà depuis janvier 1973. NBS-4 a été utilisé de façon continue pour six étalonnages de l'échelle de temps atomique du N.B.S. et sert normalement à cet effet selon un rythme mensuel ou bi-mensuel. NBS-5 a servi pour sept étalonnages de l'échelle de temps atomique du N.B.S. et on est en train de lui apporter des modifications qui amèneront quelques améliorations (en particulier de la stabilité) et qui permettront de le faire fonctionner de façon continue.

Mesures faites avec NBS-4 et NBS-5

Les stabilités de NBS-4 et NBS-5 ont été contrôlées par comparaisons mutuelles et par comparaison à d'autres oscillateurs à cristal ou à césium de grande qualité. On peut caractériser NBS-4 par $\sigma_Y = 1,5 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ et on peut décrire NBS-5 par $\sigma_Y = 0,9 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$. Au cours d'une comparaison entre NBS-4 et NBS-5, on a atteint un "plancher" de bruit de scintillation de 9×10^{-15} . L'évaluation de l'exactitude de

NBS-4 et NBS-5 comportait - séparément et indépendamment pour chaque appareil - le contrôle et la mesure du champ magnétique (typiquement 60 mOe), des inhomogénéités du champ magnétique ($< 0,5$ mOe crête à creux), du spectre d'excitation par micro-onde (bruit et bandes latérales réduits à mieux que 50 dB), des décalages liés aux asservissements, etc. On a contrôlé et mesuré de trois manières différentes le décalage dû à la phase de la cavité, qui constitue la limite la plus significative d'exactitude : a) renversement de la direction du jet (utilisé avec NBS-5), b) mesure de la distribution des vitesses suivie d'une expérience de décalage de la fréquence lorsque la puissance de l'excitation par micro-onde a été convenablement modifiée (méthode utilisée pour NBS-4 et NBS-5), et c) par une expérience de décalage de fréquence utilisant des vitesses des atomes différentes, sélectionnées grâce à un fonctionnement par impulsions de l'excitation par micro-onde (méthode utilisée pour NBS-5). Pour NBS-4 et NBS-5, on a obtenu la correction pour l'effet Doppler du second ordre à partir des distributions des vitesses du jet atomique, que l'on a déterminées à partir a) d'une excitation par impulsions et b) de l'analyse du diagramme de Ramsey. Toutes ces différentes méthodes ont conduit à un accord satisfaisant dans les limites des incertitudes évaluées indépendamment. Pour une évaluation individuelle et indépendante de l'exactitude globale, on a obtenu les incertitudes de 2×10^{-13} pour NBS-5 et de 3×10^{-13} pour NBS-4 (écarts-types). En utilisant une série d'évaluations de ce type, dont la mémoire est conservée avec l'échelle de temps atomique du N.B.S., on a atteint une exactitude voisine de 1×10^{-13} . On estime à mieux que 1×10^{-13} la reproductibilité tant de NBS-4 que de NBS-5.

Mesures du TAI

L'ensemble des 13 étalonnages individuels de l'échelle de temps atomique du N.B.S. effectués avec NBS-4 et NBS-5 depuis janvier 1973 ont conduit à des informations correspondantes sur TAI. La relation entre TAI et notre échelle de temps est connue au moyen du Loran C et des comparaisons occasionnelles d'horloges transportables. Entre janvier 1973 et septembre 1973, on a remarqué un changement dans TAI de $\Delta(y_{\text{TAI}} - y_{\text{CS}}) = - 3 \times 10^{-13}$. Depuis septembre 1973 la marche de TAI n'a pas changé. Pour cette période, nous attribuons la valeur :

$$y_{\text{TAI}} - y_{\text{CS}} = + 10 \times 10^{-13}.$$

Cette valeur comprend une correction pour l'altitude de Boulder

(relativité générale) de $1,8 \times 10^{-13}$. L'incertitude (écart-type) est de $1,6 \times 10^{-13}$; elle tient compte de l'incertitude de la mesure du Loran C.

Algorithmes et exactitude du TAI

Il semble que l'on accepte bien mieux maintenant que dans le passé la valeur des étalons primaires et leur utilisation dans le TAI pour améliorer la stabilité et l'exactitude de l'échelle de temps. En particulier les commentaires faits par MM. Guinot et Granveaud dans les documents CCDS/74-3 et CCDS/74-5 semblent spécialement appropriés. En particulier, nous sommes d'accord qu'il convient de corriger la fréquence du TAI d'une façon systématique qui n'affecte pas sa stabilité. Nous pensons également que les algorithmes de l'échelle de temps tels que ceux qui sont présentés par MM. Guinot et Granveaud sont suffisamment raffinés et proches de l'optimum pour que l'on puisse raisonnablement réduire l'effort dans cette direction.

Nous soumettons au C.C.D.S. les trois projets de recommandations joints. Nous avons suggéré la date du 1^{er} janvier 1976 pour la mise en service d'un algorithme qui pilote la fréquence du TAI selon la meilleure estimation de la seconde, car cela devrait laisser suffisamment de temps pour que des étalons primaires de fréquence de laboratoires soient achevés ailleurs qu'à la P.T.B., au N.R.C. et au N.B.S. Cela donne également suffisamment de temps à ces laboratoires pour projeter des activités d'étalonnage de routine.

PROJETS DE RECOMMANDATIONS

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

Considérant

- a. que le TAI est fondé seulement sur des appareils à césium commerciaux,
- b. que l'exactitude - bien que nominalement conforme à la définition de la seconde - est fondée seulement sur des appareils à césium de conception semblable,
- c. que, avec la réalisation actuelle de la seconde, des problèmes se manifesteraient lors de comparaisons à long terme entre des étalons à césium et des étalons utilisant d'autres atomes ou molécules et conçus selon des principes différents,
- d. que des horloges du type maser à hydrogène existent avec des stabilités à long terme comparables à celles des meilleures horloges à césium,
- e. que d'autres horloges de haute qualité sont en cours d'étude et de mise au point dans plusieurs laboratoires,

émet l'avis

que l'introduction dans l'algorithme du TAI d'informations en provenance d'horloges autres que les appareils à jet de césium pourrait améliorer la stabilité, l'exactitude et l'uniformité du TAI,

et recommande

- a. que l'information disponible à partir d'horloges du type maser à hydrogène soit incluse dans le TAI aussitôt que possible avec une pondération à déterminer par le B.I.H.,
- b. que les laboratoires soient encouragés à mettre au point et faire fonctionner comme horloges des étalons de haute qualité autres que ceux à jet de césium et à communiquer les résultats au B.I.H.,
- c. que les laboratoires soient encouragés à projeter et réaliser des comparaisons à long terme d'horloges à césium et d'étalons primaires à césium avec d'autres étalons de haute qualité.

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

Considérant

- a. que la stabilité des échelles de temps locales excède 10^{-13} pour des durées d'échantillonnage d'un jour ou plus,
- b. que la réalisation de la seconde a une exactitude meilleure que 2×10^{-13} et qu'elle sera vraisemblablement bientôt portée à mieux que 1×10^{-13} ,
- c. que les comparaisons intercontinentales de temps et de fréquence sont en premier lieu fondées sur le Loran C avec une limite d'exactitude de la synchronisation de quelques dixièmes de microseconde,
- d. qu'il existe des preuves expérimentales selon lesquelles l'exactitude supposée de la synchronisation du Loran C ne peut pas toujours être réalisée, spécialement à long terme,

émet l'avis

que les techniques actuelles utilisant la télévision et le Loran C deviendront bientôt le maillon le plus faible dans la réalisation du TAI,

recommande

que l'on recherche et que l'on mette au point des méthodes différentes ou améliorées pour les techniques de comparaison de temps et de fréquence de haute exactitude aux distances intercontinentales,

et que les retards des signaux de télévision et du Loran C soient étalonnés avec exactitude de façon courante au moins une fois par an au moyen d'horloges transportables ou par d'autres moyens indépendants.

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

Considérant

- a. que la seconde peut être réalisée dans plusieurs laboratoires nationaux avec une exactitude meilleure que 2×10^{-13} ,
- b. que les mesures de trois laboratoires (P.T.B., N.R.C., N.B.S.), concordantes à mieux que 1×10^{-13} environ, montrent que la seconde du TAI est trop courte de 1×10^{-12} (automne 1973),
- c. que les mesures de deux laboratoires (P.T.B., N.B.S.) indiquent une dérive de la seconde du TAI,
- d. que davantage de laboratoires devraient être encouragés à contribuer à l'exactitude du TAI,
- e. qu'il est souhaitable de limiter les ajustements par sauts du TAI à une valeur correspondant au bruit du TAI,

recommande

- a. qu'un algorithme soit mis au point pour piloter le TAI sur la meilleure estimation de la seconde,
- b. que les laboratoires poursuivent la mise au point d'étalons primaires de temps et de fréquence,
- c. que les laboratoires déterminent régulièrement et communiquent au B.I.H. leurs meilleures estimations de la seconde,
- d. que l'algorithme soit appliqué par le B.I.H. à partir du 1^{er} janvier 1976.

(13 juin 1974)

ANNEXE S 10

Changement de fréquence du TAI

Par G. BECKER

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Rép. Féd. d'Allemagne)

(Traduction du Document CCDS/74-12)

Les résultats donnés antérieurement (Document CCDS/74-6, Annexe S 5) sont indiqués sur le graphique ci-joint. Les sept résultats de mesure obtenus depuis mai 1973 ont été regroupés en deux valeurs (à droite de la ligne pointillée). En ce qui concerne les résultats obtenus jusqu'à mars 1973, qui ont été publiés en 1973⁽¹⁾, on a pu ajouter sur le graphique une valeur supplémentaire (pour MJD = 41639).

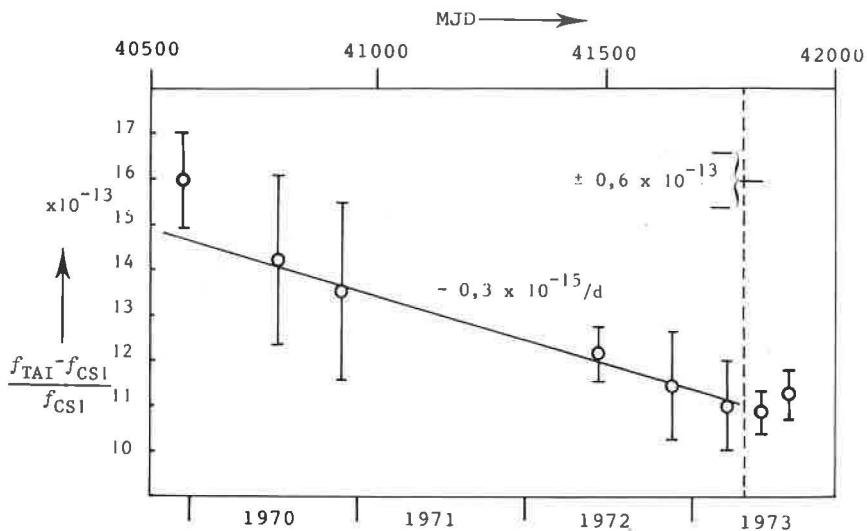
Les incertitudes (σ_S) se rapportent à la précision (reproductibilité) des mesures. Les résultats à gauche de la ligne pointillée sont cohérents avec ceux à droite de cette ligne à seulement $\pm 0,6 \times 10^{-13}$ près. C'est une valeur améliorée par rapport à celle qui a été publiée auparavant ($1,0 \times 10^{-13}$). En liaison avec cette évaluation améliorée, toutes les valeurs antérieures à mai 1973 diminuent de $0,5 \times 10^{-13}$.

Il y a de bonnes raisons de penser que la différence de phase du résonateur de CS1 a été pratiquement constante entre 1969 et mars 1973. Les résultats que l'on obtient en supposant constante la différence de phase sont dans leur essence les mêmes que ceux qui sont indiqués sur le graphique, mais les incertitudes σ_S sont nettement plus petites.

(1) BECKER (G.), *PTB-Mitt.*, 83, 1973, p. 319.

Entre juin 1970 et mars 1973, la variation de fréquence relative moyenne de TAI a été d'environ $- 0,3 \times 10^{-15}$ par jour.

(18 juin 1974)



ANNEXE S 11

Commentaires sur le rapport du Président du Groupe de travail sur les échelles de temps

Par G. BECKER

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Rép. Féd. d'Allemagne)

(Traduction du Document CCDS/74-13)

Le rapport du Président (Annexe S 6) donne un excellent compte rendu des nombreux problèmes impliqués. L'opinion de la P.T.B. à l'égard de certains de ces problèmes a déjà été donnée dans des contributions antérieures au C.C.D.S. Quant à d'autres problèmes, il vaut mieux qu'ils soient discutés durant la réunion du C.C.D.S.

Dans la suite, on donnera seulement quelques commentaires sur le rapport du Président. Les chiffres correspondent aux paragraphes du rapport.

3.3. Changements de la fréquence du TAI

La preuve de changements systématiques de la fréquence du TAI n'est fondée que sur l'étalon primaire CS1 de la P.T.B. Dans les mesures faites depuis octobre 1969, on a observé un changement systématique de fréquence relative du TAI d'environ $0,3 \times 10^{-15}$ par jour. Dans le passé, il n'y avait pas d'autres étalons de laboratoire capables de détecter ces petits changements. Il s'était écoulé trop peu de temps pour que de nouveaux étalons de laboratoire de qualité suffisante détectent des petits changements systématiques du TAI.

3.3. Comparaison d'étalons

Comme des améliorations des étalons primaires sont encore réalisables, par exemple jusqu'à l'ordre de 10^{-14} , des méthodes

améliorées de comparaison de temps sont nécessaires pour la comparaison des étalons. Pour comparer les étalons du N.B.S. et de la P.T.B. avec une incertitude inférieure à 10^{-14} et une durée de mesure raisonnable, une liaison par satellite est nécessaire.

3.4. Effets relativistes

On doit déjà tenir compte des effets relativistes (déplacement gravitationnel "vers le rouge") dans les comparaisons des étalons de la P.T.B. et du N.B.S.

3.5., 3.6., 4.4. Décompte des secondes et des jours dans le TAI

On ne considère pas comme désirable l'introduction officielle d'une méthode de décompte décimal des secondes de TAI. Il n'y a bien entendu aucune objection à un décompte décimal des secondes pour les datations, à condition que la date de départ du décompte décimal soit clairement indiquée. Cette date n'a pas nécessairement besoin d'être l'origine du TAI, elle peut tout aussi bien être par exemple le commencement d'une année de calendrier du TAI ou une date dans MJD.

Il n'y a aucune raison évidente d'éviter des valeurs négatives dans le décompte vers le passé à partir d'un instant donné. Nous n'appuyons pas la proposition de ne pas utiliser MJD en relation avec le TAI. (Cette proposition est en contradiction avec la recommandation 7/457 du C.C.I.R.).

Nous n'appuyons pas non plus les systèmes proposés de calendrier TAI avec la désignation SA (Secondes Atomiques) et JA (Jours Atomiques).

3.8. Tolérances des échelles de temps nationales (légales)

On pense qu'il s'agit là d'un problème exclusivement national. En ce qui concerne l'émission des signaux horaires, les tolérances sont déterminées par le C.C.I.R. Les propositions du C.C.D.S. seront prises en considération par le C.C.I.R.

3.9. Temps astronomique

On ne comprend pas la déclaration : "que le TAI fut à l'origine choisi pour concorder avec le temps des éphémérides". Cela semble n'être correct que pour la durée de la seconde.

4.2. Notations

Les propositions sont acceptables.

4.3. Remplacement futur du TUC par le TAI

Il est vraisemblable qu'un remplacement du TUC par le TAI n'interviendra jamais. Si l'on décide que l'échelle de temps (TI) dont on déduit l'heure des fuseaux sera un temps atomique pur, il est probable que cela sera réalisé simplement en n'introduisant plus de secondes intercalaires. Dans ce cas, il y aurait une différence de temps constante de N secondes entre le TI et le TAI. La satisfaction de n'avoir qu'une échelle de temps (TAI) comme référence générale de temps ne justifiera - probablement - pas l'introduction d'un saut dans l'heure légale, même s'il est exactement d'une minute. En conséquence, on pense que la désignation TI demeurera en usage. La désignation TUC ne serait pas appropriée à cette utilisation.

(18 juin 1974)

ANNEXE S 12

Étalon de fréquence à césium du N.R.L.M. (Japon)

Par Y. KOGA, Y. NAKADAN et J. YODA

(Traduction du Document CCDS/74-14)

1. Introduction

Un résonateur à césium de laboratoire, construit en 1971, a été soumis à un travail expérimental portant sur les caractéristiques fondamentales d'un tel appareil à jet et sur les améliorations à lui apporter afin d'en faire un étalon primaire.

Ce document donne les caractéristiques principales de sa construction et les résultats des expériences préliminaires.

2. Description de l'instrument

L'optique du jet du résonateur est de conception habituelle, du type axial, avec un faisceau plat de 0,4 mm x 10 mm, deux aimants de déviation dipolaires et une cavité à micro-ondes du type Ramsey de longueur d'interaction 2,4 m.

Deux chariots mobiles portant chacun un four et un détecteur sont montés aux deux extrémités de la chambre du jet afin de permettre de renverser facilement la direction du jet sans rompre le vide. Cela permet de déterminer le décalage de fréquence dû à la différence de phase de la cavité.

La cavité à micro-ondes est montée à l'intérieur de blindages magnétiques dans la chambre à vide afin de réduire l'effet des variations de la température ambiante et d'éliminer la différence de phase due aux fenêtres à vide. En conséquence,

comme le montre la figure 1, un guide d'onde d'alimentation passant par une fenêtre à vide est connecté au centre de la cavité et est fixé à la chambre à vide par une bride avec des soufflets de façon à ne pas exercer de contrainte sur la cavité.

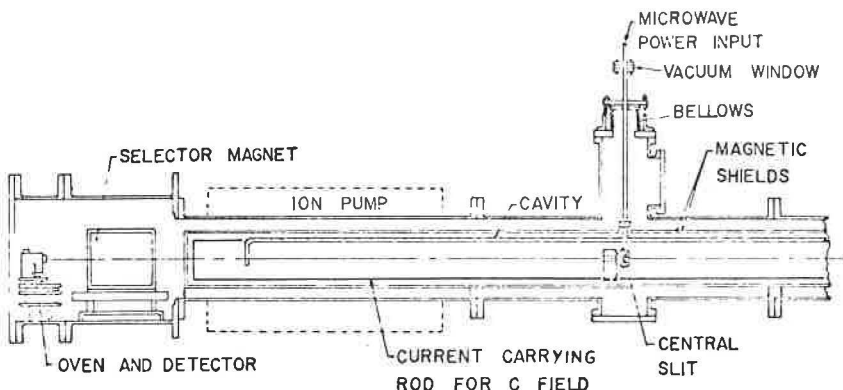


Fig. 1.- Etalon de fréquence à césium du N.R.L.M.

Le champ C est produit perpendiculairement à l'axe du jet par quatre tubes de cuivre à l'intérieur des blindages magnétiques. Douze bobines de Zeeman sont disposées à intervalles presque réguliers pour mesurer la distribution spatiale du champ C au moyen de la transition de basse fréquence.

La figure 2 donne le schéma général des circuits électroniques d'asservissement. On utilise deux oscillateurs à quartz pour l'excitation et la synthèse de la fréquence. L'un d'eux est à 5 MHz et l'autre a une fréquence fractionnaire que l'on choisit égale à un sous-multiple de la fréquence de résonance du césium. Ce dernier oscillateur est asservi par comparaison de la phase entre le signal de battement des fréquences micro-ondes et le signal de référence à 12,631 ... MHz provenant d'un synthétiseur de fréquence ordinaire. L'autre est maintenu sur la raie de résonance atomique au moyen d'un servo-système utilisant une modulation à basse fréquence.

3. Résultats préliminaires

La figure 3 montre l'enregistrement d'un signal de résonance de Ramsey typique de la transition $(4,0) \rightarrow (3,0)$. La largeur totale à mi-hauteur est d'environ 63 Hz pour une excitation micro-onde optimale.

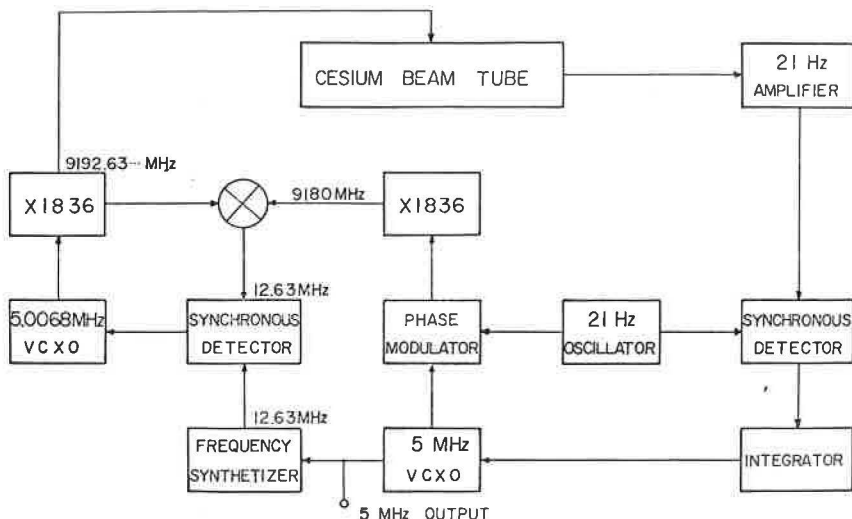


Fig. 2.- Schéma synoptique des asservissements.

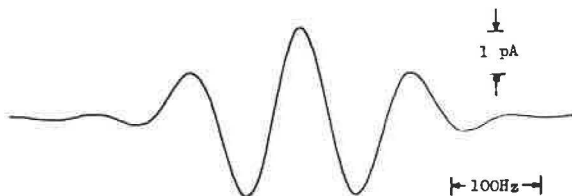


Fig. 3.- Signal de résonance de Ramsey de la transition $(4,0) \rightarrow (3,0)$.

La stabilité de la fréquence $\sigma(2, \tau, \tau)$ est estimée à $1,4 \times 10^{-11} \tau^{-\frac{1}{2}}$ pour une durée d'échantillonnage inférieure à 30 secondes, au moyen d'une comparaison avec un oscillateur à quartz stable. Pour des durées d'échantillonnage supérieures, jusqu'à 10^5 secondes, on obtient une valeur minimale de $2,3 \times 10^{-13}$ à partir de l'enregistrement de la phase avec une horloge à césium Hewlett-Packard. Vraisemblablement, la limite de stabilité que l'on rencontre ici provient du changement de fréquence de l'oscillateur de référence dû à la variation des conditions ambiantes. Cela sera confirmé par l'installation prochaine d'un autre oscillateur.

On observe de légers décalages de fréquence, qui sont

attribués aux contraintes exercées sur la cavité par la fixation à la chambre à vide du guide d'onde d'alimentation et aussi à la dérive des circuits électroniques.

Le travail est poursuivi actuellement pour apporter des améliorations à la stabilité et à l'exactitude.

(10 juin 1974)

ANNEXE S 13

Rapport pour la 7^e session du C.C.D.S.

**Radio Research Laboratories
et
National Research Laboratory of Metrology (Japon)**

(Traduction du Document CCDS/74-15)

Ce rapport concerne l'ordre du jour de la 7^e session du C.C.D.S. et expose un certain nombre de points de vue exprimés par les membres du comité national japonais pour le temps et la fréquence.

1. TRAVAUX SUR LES ÉTALONS ATOMIQUES DE FRÉQUENCE

A. Maser à hydrogène

Les travaux poursuivis aux Radio Research Laboratories sur les masers à hydrogène depuis la dernière session du C.C.D.S. ont porté essentiellement sur l'amélioration de la stabilité.

On a fait une analyse du système automatique d'accord de la cavité, fondée tant sur la dérive de fréquence de la cavité que sur le bruit de fréquence : bruit blanc et bruit de scintillation. En ce qui concerne la dérive de fréquence de la cavité, on a soigneusement étudié le déplacement de la fréquence de résonance dû aux changements de température, y compris les effets du ballon de stockage.

Au cours des expériences, on a ajouté un autre blindage magnétique intérieur au triple blindage initial et on a ainsi obtenu une meilleure stabilité pour τ supérieur à plusieurs secondes.

Un maser nouvellement conçu est en cours de fabrication.

B. Étalon de fréquence à jet de césium

Au N.R.L.M., on a soumis à des recherches expérimentales pour évaluation de ses possibilités et pour amélioration, un résonateur à césium de laboratoire, construit en 1971.

On a mesuré une stabilité de fréquence, $\sigma(2, \tau, \tau)$, d'environ $1,4 \times 10^{-11} \tau^{-\frac{1}{2}}$ pour une durée d'échantillonnage inférieure à 30 secondes, au moyen de la mesure de la période de battement avec un oscillateur stable à cristal. D'autre part, pour une durée d'échantillonnage supérieure, jusqu'à 10^5 secondes, on a montré, à partir d'un enregistrement de phase fait par référence à une horloge à césium Hewlett-Packard, que σ suivait la loi en $\tau^{-\frac{1}{2}}$ et atteignait une valeur de $2,3 \times 10^{-13}$ pour une journée.

Les recherches vont être poursuivies pour améliorer encore la stabilité et l'exactitude, et le second résonateur à césium est en cours de construction.

2. TAI

1. La seconde du TAI est fondée sur la seconde du SI, dont la valeur adoptée par définition provient de la seconde du TE ; cependant, la date de l'origine est définie de façon conventionnelle par le TU2 sans tenir compte de la relation avec la date du TE. En conséquence, il peut être plus logique et plus commode en pratique de faire mieux concorder la date du TAI avec celle du TE.

2. Deux décennies seulement se sont écoulées depuis que le temps atomique est utilisé en pratique. Si l'on considère l'avenir, il est préférable qu'un changement de l'origine du TAI intervienne le plus tôt possible et il ne devrait pas y avoir trop de confusion dans la période transitoire.

Compte tenu des considérations précédentes, nous approuvons la résolution N° 2 des Commissions 4 et 31 de l'U.A.I. (Sydney, 1973) concernant un changement du TAI de 32,0 secondes et nous préférons une nouvelle définition de l'origine à un ajustement par un saut de 32,0 secondes. Le nouveau TAI devrait être conservé sans aucune modification ultérieure même si à l'avenir le TE s'écartait de façon significative du nouveau TAI.

3. LA SECONDE DU TAI

Pour l'amélioration de l'exactitude du TAI actuel, il est préférable de faire un ajustement au moyen d'un saut de $- 1,0 \times 10^{-12}$ dans la marche du TAI au commencement d'une année donnée.

A partir de ce moment là, l'exactitude du TAI serait conservée pendant une durée assez longue en utilisant l'excellente uniformité du TAI obtenue par le B.I.H.

Pour assurer la meilleure exactitude du TAI, des poids supérieurs devraient être donnés à la comparaison avec les étalons primaires. Dans la pratique, toutefois, pour l'étalonnage effectif du TAI, on doit avoir un nombre suffisant de données de comparaison sur une période suffisamment longue pour reconnaître une altération significative de l'exactitude.

4. UTC

Le C.C.D.S., l'U.A.I., l'U.R.S.I. et le C.C.I.R. sont d'avis que UTC est particulièrement approprié pour être l'unique échelle de temps mondiale d'usage général.

Comme le système UTC joue maintenant un rôle très important, il est souhaitable qu'il soit décidé d'une règle unifiée après consultations mutuelles entre le C.C.D.S., l'U.R.S.I., le C.C.I.R. et l'U.A.I., en consacrant le temps suffisant pour aboutir à la meilleure conclusion. La règle devrait être aussi simple et aussi facile à comprendre pour le public que possible, et satisfaire les besoins des utilisations scientifiques.

Le Japon est d'avis que les dates retenues pour les secondes intercalaires devraient être limitées à deux jours à la fin de décembre et/ou à la fin de juin, et que l'on devrait accroître la tolérance jusqu'à environ une seconde.

5. COMPARAISONS INTERNATIONALES DE TEMPS

Au Japon et alentour une vingtaine d'étalons de travail au césium fonctionnent ; ils ont été comparés entre eux au moyen de la chaîne Loran-C du Pacifique nord-ouest et des réseaux de télévision. Toutefois, il n'y a aucune possibilité de comparaison intercontinentale, sauf, grâce à l'U.S.N.O., au moyen d'horloge transportable. Il est très souhaitable d'organiser des comparaisons internationales par des méthodes modernes,

utilisant par exemple les satellites, l'interférométrie à très longue base ou d'autres méthodes afin d'augmenter le nombre d'horloges qui contribuent à l'élaboration du TAI.

(18 juin 1974)

Rapport pour la 7^e session du C.C.D.S.

Laboratoire de l'Horloge Atomique (France)

(Document CCDS/74-16)

1. PROGRÈS DES ÉTALONS ATOMIQUES DE FRÉQUENCE ET DES HORLOGES ATOMIQUES

1.1. Détermination de l'effet Doppler du second ordre dans les étalons à jet de césium

Une méthode très directe, pour la détermination du déplacement de fréquence provoqué par l'effet Doppler du second ordre et par celui du déphasage entre les deux bras de la cavité résonnante, a été proposée. Elle s'applique spécialement bien aux étalons primaires à jet de césium de laboratoire.

Contrairement aux autres méthodes connues, elle ne nécessite pas la connaissance explicite de la loi de distribution des vitesses des atomes de césium détectés. Elle utilise la notion de "moments" de la fonction de distribution des vitesses. Ceux-ci permettent le calcul des déplacements de fréquence considérés et ils peuvent être obtenus très simplement à partir de la partie centrale de la courbe de résonance.

Dans le cadre d'une collaboration avec le Conseil National de Recherches à Ottawa, cette méthode a été appliquée au calcul de l'effet Doppler du second ordre dans les étalons primaires de fréquence Cs III et Cs V [1]. Les résultats obtenus sont

égaux, à 0,3 mHz près (3×10^{-14}), à ceux qui sont dérivés de la méthode développée précédemment dans ce Laboratoire.

1.2. Masers à hydrogène

Les deux masers à hydrogène construits au Laboratoire [2] pour évaluer leurs propriétés comme étalons de fréquence permettent une stabilité (au sens de Allan) de 4×10^{-13} pour $\tau = 1$ s, 2 à 3×10^{-15} pour $\tau = 10^3$ s, 2×10^{-14} pour $\tau = 1$ jour. Des travaux sont en cours pour améliorer la stabilité dimensionnelle de la cavité résonnante. Un système d'accord automatique de la cavité résonnante, de conception classique, a été réalisé. Il maintient la stabilité de fréquence comprise entre 1 et 2×10^{-14} pour $\tau = 5$ jours [3].

Le déplacement de la fréquence d'oscillation du maser à hydrogène, qui apparaît sous l'effet combiné des inhomogénéités du champ magnétique micro-onde et du champ magnétique statique, et qui dépend de la grandeur de ce champ statique, a été soigneusement mesuré sur nos deux appareils. Dans leur configuration actuelle, ce déplacement de fréquence est inférieur à 10^{-13} , en valeur relative, lorsque le champ magnétique directeur est plus grand que 3×10^{-7} T (3 milligauss).

Des travaux sont en cours pour améliorer la précision de la mesure de l'effet de paroi.

1.3. Lasers à He-Ne stabilisés par absorption saturée dans l'iode ou le méthane

a) *Absorption saturée dans le méthane.*— La stabilité de fréquence de lasers à He-Ne stabilisés par absorption saturée dans le méthane (cuve interne) a été mesurée. Deux techniques d'asservissement ont été comparées. L'une est celle de la dérivée première, l'autre celle de la dérivée troisième qui réduit les effets liés au profil d'oscillation du laser. L'emploi de cette dernière technique fournit les meilleurs résultats en ce qui concerne la stabilité de fréquence à long terme : 8×10^{-14} pour $\tau = 10^3$ s par exemple [4]. La reproductibilité est de 2×10^{-11} . Elle est limitée par l'effet de structure hyperfine de la raie utilisée. L'étude de la raie E du méthane, exemple de structure hyperfine, est entreprise.

b) *Absorption saturée dans l'iode.*— La stabilité de fréquence de lasers à He-Ne oscillant dans le visible et stabilisés par absorption saturée dans l'iode 127 (cuve interne) est de 8×10^{-13} pour 10^3 s [4]. La reproductibilité est de

3×10^{-11} . Une comparaison avec un laser construit par le Bureau International des Poids et Mesures a confirmé des mesures indépendantes [5] de l'écart entre les composantes de structure hyperfine de la raie utilisée (R 127) ainsi que la valeur citée de la reproductibilité.

2. CARACTÉRISATION DE LA STABILITÉ DE FRÉQUENCE

L'incertitude sur la caractérisation de la stabilité de fréquence d'oscillateurs très stables, liée au nombre fini des mesures, a été calculée théoriquement pour les différents types de bruit de fréquence qui sont considérés classiquement. Les résultats ont été confirmés expérimentalement pour le bruit blanc de phase et le bruit "flicker" de fréquence [6].

BIBLIOGRAPHIE

1. AUDOIN (C.), LESAGE (P.) and MUNGALL (A.G.), Second-order Doppler and cavity phase dependent frequency shifts in atomic beam frequency standards, 1974 Conference on Precision Electromagnetic Measurements, *IEEE Trans. on Instr. and Meas.*, IM-23, N° 4, 1974, pp. 501-508.
2. PETIT (P.), VIENNET (J.), BARILLET (R.), DESAINTEFUSCIEN (M.) and AUDOIN (C.), Development of hydrogen masers as frequency standards at the Laboratoire de l'Horloge Atomique, *Metrologia*, 10, N° 2, 1974, pp. 61-67.
3. PETIT (P.), VIENNET (J.), BARILLET (R.), GHEORGHIU (O.), DESAINTEFUSCIEN (M.) et AUDOIN (C.), Étalons de fréquence à hydrogène atomique, Colloque International de Chronométrie, Stuttgart, 16-21 septembre 1974.
4. BRILLET (A.), CERESZ (P.) and CLERGEOT (H.), Frequency stabilization of He-Ne lasers by saturated absorption, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, QE-10, juin 1974.
5. CERESZ (P.), BRILLET (A.) and HARTMANN (F.), Metrological properties of the R(127) line of iodine studied by laser saturated absorption, 1974 Conference on Precision Electromagnetic Measurements, *IEEE Trans. on Instr. and Meas.*, IM-23, N° 4, 1974, pp. 526-528.
6. LESAGE (P.) and AUDOIN (C.), Characterization of frequency stability : Uncertainty due to the finite number of measurements, *IEEE Trans. on Instr. and Meas.*, IM-22, 1973, pp. 157-161.

(24 juin 1974)

ANNEXE S 15

Travaux récents sur le maser à hydrogène aux R.R.L. (Japon)

Par Y. SABURI, M. KOBAYASHI et K. YOSHIMURA

(Traduction du Document CCDS/74-17)

Depuis la dernière session du C.C.D.S., les travaux sur le maser à hydrogène effectués aux Radio Research Laboratories ont porté essentiellement sur l'amélioration de la stabilité. Un maser nouvellement conçu est maintenant en cours de fabrication.

Voici un résumé des récentes recherches.

1. ACCORD AUTOMATIQUE DE LA CAVITÉ

On a conçu et fabriqué pour les deux masers à hydrogène un système d'accord automatique de la cavité utilisant le changement de l'intensité du faisceau ; chacun d'eux est accordé à tour de rôle en utilisant l'autre comme référence. Des études théoriques faites sur le système ont montré que la dérive de la cavité et le bruit aléatoire des deux masers peuvent être amplifiés par la boucle d'asservissement par un facteur $G = K/(\Delta PL/PL_{hi})$. Dans cette formule, K représente le gain du système en boucle ouverte et $\Delta PL/PL_{hi}$ la variation relative du facteur d'entraînement correspondant au changement de l'intensité du faisceau atomique par rapport au facteur d'entraînement pour un faisceau de forte intensité. Il est donc important que le rapport de ΔPL à PL_{hi} soit aussi grand que possible.

Le phénomène d'amplification de la dérive de la cavité

peut toutefois être éliminé en effectuant des mesures au cours desquelles l'intensité du faisceau est successivement forte, faible, faible et forte pour déterminer l'erreur. Dans ce cas, l'influence de la dérive de la cavité se traduit par un décalage constant de la fréquence $\alpha T_p / K$ et une variation en dents de scie αT_p , où α est le taux de dérive et T_p la période de détection de l'erreur. Par conséquent, plus K est grand, plus le décalage de fréquence est petit.

L'erreur quadratique moyenne due au bruit aléatoire, rapportée à la fréquence de sortie du maser, est :

$$\langle \delta f_{mn}^2 \rangle^{1/2} / f_0 \approx \sqrt{2G} [\langle \sigma_{yn, l_0}^2(2, T, \tau) \rangle_{f_0} + \langle \sigma_{yn}^2(2, T, \tau) \rangle_{f-1} + \langle \sigma_{yr}^2(2, T, \tau) \rangle]^{1/2}$$

Dans cette formule, le premier et le second terme entre crochets représentent la mesure de la stabilité en fonction du temps, due respectivement au bruit blanc de fréquence et au bruit de scintillation, et le troisième terme représente la stabilité du maser de référence ; f_0 est la fréquence du maser ; l'indice l_0 correspond à une intensité faible du faisceau. Une valeur de K plus grande peut rendre plus mauvaise la stabilité à court terme du maser. Si la fréquence de résonance de la cavité est suffisamment stable pour permettre des durées de mesures assez longues, on peut faire la moyenne des signaux d'erreur obtenus à partir de plusieurs séries de mesures pour fournir à la cavité un signal de correction de façon à réduire les influences du bruit aléatoire.

Les simulations par ordinateur donnent également des renseignements utiles pour choisir au mieux les paramètres (τ , T_p , K , etc.) pour des conditions données de dérive de fréquence de la cavité et de bruit aléatoire.

Dans notre cas, la stabilité de la fréquence du maser sans accord automatique de la cavité était de quelques 10^{-14} pour des durées d'échantillonnage de 10^2 à 10^3 secondes. La dérive linéaire de fréquence rapportée à la fréquence de sortie du maser était inférieure à 1×10^{-12} par jour avec une régulation de température de la cavité et supérieure à 1×10^{-11} sans cette régulation. Il s'est avéré que, pour $k \approx 0,1$ et $\Delta PL / PL_{hi} \approx 0,1$, le système d'accord automatique de la cavité maintenait constante la fréquence de sortie du maser avec une précision de quelques 10^{-13} ou moins pendant quelques jours, même sans régulation de température. A partir de là on envisage

maintenant de nouvelles améliorations de façon à avoir un fonctionnement plus perfectionné du système d'accord automatique de la cavité.

2. EFFET DU BALLON DE STOCKAGE SUR LA FRÉQUENCE DE RÉSONANCE

La variation de la permittivité de la silice fondue utilisée pour le ballon de stockage et son support, et leur déplacement, dus à la variation de la température, produisent un décalage de la fréquence de résonance de la cavité du maser. Pour contrôler l'ordre de grandeur de ce décalage, on a calculé la permittivité équivalente à la fois pour le ballon de stockage et pour son support dans la cavité, on a ensuite examiné pour notre maser le décalage relatif de fréquence de la cavité dû à la variation de température.

Dans le calcul, nous avons supposé que le ballon de stockage a la forme d'un cylindre, dont le diamètre est égal à la hauteur et aussi qu'il est placé au centre de la cavité. On peut assimiler un ballon sphérique au ballon cylindrique équivalent de même épaisseur dont on obtient les dimensions en exprimant que sa masse est la même que celle du ballon sphérique.

Pour notre maser avec le ballon de stockage (en silice fondue, 15 cm de diamètre, 1 mm d'épaisseur), le revêtement de téflon (de 0,01 mm d'épaisseur) et le support (cylindre de silice fondue de 4 cm de diamètre et 2 mm d'épaisseur), nous obtenons l'expression suivante :

$$\begin{aligned} \frac{1}{f_c} \cdot \frac{\partial f_c}{\partial T} &= - 5,8 \times 10^{-3} \frac{d\epsilon_{rB}}{dT} - 4,5 \times 10^{-5} \frac{d\epsilon_{rC}}{dT} \\ &\quad - 7,6 \times 10^{-5} \frac{d\epsilon_{rS}}{dT} - 1,0 \times 10^{-8} (\epsilon_{rB}-1) \\ &\quad - 5,8 \times 10^{-9} (\epsilon_{rC}-1) - 4,3 \times 10^{-8} (\epsilon_{rS}-1) \end{aligned}$$

dans laquelle ϵ_{rB} , ϵ_{rC} et ϵ_{rS} sont les permittivités relatives respectives du ballon, du revêtement et du support.

En prenant les valeurs suivantes :

$$\epsilon_{rB} = \epsilon_{rS} = 4, \quad \frac{d\epsilon_{rB}}{dT} = \frac{d\epsilon_{rS}}{dT} = 53 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \quad (1),$$

(1) Communication privée du Dr D. Morris du N.R.C.

$$\epsilon_{rc} = 2, \quad \frac{d\epsilon_{rc}}{dT} = - 4,5 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C},$$

nous obtenons :

$$\begin{aligned} \frac{1}{f_c} \cdot \frac{\partial f_c}{\partial T} &= (- 3,074 \times 10^{-7} + 2,01 \times 10^{-8} - 4,0 \times 10^{-9} \\ &\quad - 2,63 \times 10^{-8} - 6,0 \times 10^{-9} - 1 \times 10^{-9})/^{\circ}\text{C} \\ &= - 3,24 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}. \end{aligned}$$

Cette valeur correspond à une variation d'environ 460 Hz/°C de la fréquence de résonance de la cavité ; cette valeur est en accord étroit avec la valeur de 700 Hz/°C mesurée par le Dr Morris du N.R.C. pour un ballon de 16 cm de diamètre et 1 mm d'épaisseur⁽¹⁾.

Le résultat montre que l'effet de la variation de la permittivité pour le ballon de stockage, en raison d'une variation de température, devient en fait essentiel.

L'effet peut être réduit presque proportionnellement à l'épaisseur de la paroi du ballon, mais il peut être très difficile de fabriquer un ballon ayant une paroi de moins de 0,5 mm d'épaisseur. C'est pourquoi un ballon en silice ultra pure est très intéressant.

3. BLINDAGE MAGNÉTIQUE

Afin de diminuer les effets des fluctuations magnétiques externes sur la stabilité du maser, on a ajouté un autre blindage magnétique interne à l'ancien blindage qui comportait trois couches.

On a mesuré la variance d'Allan de la fluctuation magnétique pour diverses durées d'échantillonnage allant de 1 ms à 100 s en utilisant un fluxmètre, un convertisseur tension-fréquence et un compteur calculateur. Le résultat a montré que le quadruple blindage était efficace, en particulier pour des fluctuations de période supérieure à plusieurs secondes ; cela a été aussi confirmé par les mesures de stabilité des masers fonctionnant à champ magnétique statique élevé, par exemple 10 mOe. En conséquence, on estime que l'effet des fluctuations magnétiques sur la stabilité pour une durée d'échantillonnage comprise entre plusieurs secondes et 100 secondes peut être

réduit à moins de 1×10^{-15} dans le cas d'un fonctionnement avec un blindage magnétique à quatre couches et un champ statique de 1 mOe.

En ce qui concerne le blindage magnétique, nous avons comparé deux méthodes de démagnétisation, l'une consistant à faire passer le courant alternatif dans le conducteur intérieur aux cylindres de blindage magnétique et l'autre à faire passer le courant longitudinalement dans le matériau de blindage lui-même. Comme les résultats de la démagnétisation sont les mêmes, cette dernière méthode peut être plus commode en pratique et aussi pour la construction du maser.

(Juin 1974)

Réseaux de données à large bande et TAI

Conseil National de Recherches (Canada)

(Traduction du Document CCDS/74-18)

La Bell Canada installe au laboratoire horaire du N.R.C. une ligne à 9,6 kilobauds et un terminal de son système "Data Route" à 56 kilobauds déjà en service. On considère comme avantage mutuel que le N.R.C. contrôle la fréquence et le fonctionnement de l'horloge du système.

La Bell Canada a l'impression que ces renseignements seront utiles au développement technique.

Le N.R.C. désire étudier le fonctionnement en vue de l'utilisation future éventuelle des systèmes de transmission de données à grande vitesse pour la diffusion précise du temps et de la fréquence.

On pense également que si nous pouvons fournir à "Data Route" une mesure absolue de sa fréquence, un procédé semblable aux États-Unis permettrait de connecter les systèmes de transmission de données des deux pays sans que l'un ou l'autre ait une position subordonnée. En conséquence, la référence des systèmes à l'Échelle de Temps Atomique International, par l'intermédiaire des laboratoires nationaux, pourrait avoir des aspects internationaux importants et une importance commerciale grandissante au fur et à mesure que le débit et la quantité de données s'accroissent.

(27 juin 1974)

ANNEXE S 17

Contribution du N.P.L. (Royaume-Uni) pour la 7^e session du C.C.D.S.

(Traduction du Document CCDS/74-19)

1. ÉTALONS ATOMIQUES DE FRÉQUENCE ET DE TEMPS

1.1. *Étalon à jet de césium.* - Les travaux ont continué sur le nouvel étalon NPL III, bien que par suite de retards de fabrication et de difficultés techniques, le programme de mise au point soit en retard d'environ six mois. Toutefois, le montage de l'étalon est maintenant pratiquement achevé et on pense que le jet fonctionnera dans quelques mois.

Le nouvel étalon est conçu pour atteindre une exactitude de $2 \text{ à } 3 \times 10^{-13}$, combinée à une stabilité à court terme de 1×10^{-12} sur une durée de 1 seconde. Pour atténuer le problème de l'uniformité du champ dans la région de la transition, on a choisi un champ C axial. Le fonctionnement en jet réversible sera possible ; le four et le détecteur à chaque extrémité du jet sont montés sur un chariot capable de traverser l'axe du jet. La longueur d'interaction est de 93 cm, et la largeur de résonance attendue est de 190 Hz.

Dans les étalons primaires à césium existants, la plus importante contribution à l'erreur totale semble provenir du manque d'égalité des phases dans les champs séparés pour l'excitation du type Ramsey. On poursuit donc des recherches sur une nouvelle conception de la cavité et de l'alimentation par guide d'onde qui assurera une égalité de phase précise sans

tolérances mécaniques extrêmement étroites ni réglages astreignants.

1.2. *Maser à hydrogène.*— On continue à faire fonctionner deux masers à hydrogène afin d'obtenir des sources cohérentes en phase pour des comparaisons à court terme, en particulier pour évaluer les qualités de NPL III. Un maser est particulièrement bien adapté à la mesure rapide de l'effet de paroi et on l'utilise dans un programme limité qui tente de relier l'effet de paroi aux propriétés physiques du revêtement du ballon telles qu'elles sont révélées par microscopie électronique au moyen de l'instrument de 1 MV du N.P.L.

Un compte rendu des travaux sur le maser à hydrogène et les techniques de mesure de l'effet de paroi et de l'accord de cavité a été publié [1].

2. TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL

2.1. *Échelle de TAI.*— L'échelle de temps est maintenant fondée sur environ 60 étalons commerciaux appartenant à 15 laboratoires et observatoires répartis dans 12 pays d'Europe occidentale et d'Amérique du Nord. Ces chiffres sont à comparer aux 7 installations réparties dans 6 pays dont il était tenu compte dans la précédente méthode de calcul du TAI comme moyenne d'échelles de temps et non d'horloges individuelles. Tout nouvel élargissement de la base du TAI nécessiterait une extension au-delà des limites géographiques restreintes imposées par la couverture des ondes de sol des chaînes Loran-C synchronisées.

On est en train de faire des recherches sur une méthode qui s'appuie sur la corrélation horaire obtenue entre les stations aux extrémités de la base en interférométrie par radio. Cela permet d'établir rétroactivement une relation horaire avec une incertitude qui dépend de la largeur de bande effective et d'autres facteurs, dans le domaine 50-500 ns. Le N.P.L. a réalisé une synchronisation de la station de Chilbolton Field (de l'Appleton Laboratory) qui participe à des observations en interférométrie à très longue base (V.L.B.I.) avec l'Algonquin Radio Observatory, Ontario, sur une base de 5 260 km de longueur. Plusieurs expériences ont été faites en 1972-73 [2], mais des difficultés survenues dans la réduction des données ont empêché d'en tirer des renseignements sur l'heure.

Une nouvelle série d'expériences débiteront plus tard

cette année et, en préparation, on a étalonné entre Teddington et Chilbolton une liaison précise par télévision. On espère que les comparaisons en V.L.B.I. fourniront un moyen de vérifier de façon régulière l'exactitude du transfert de l'heure par Loran-C à travers l'Atlantique Nord.

En plus de la synchronisation de l'heure, il est possible aussi d'obtenir une comparaison directe de fréquence en observant la fréquence des franges à chaque extrémité de la base de V.L.B.I. Au moyen d'observations au cours de la plus grande partie d'un jour sidéral, on peut séparer les différences entre oscillateurs des erreurs dans la longueur présumée de la base. On peut mesurer la fréquence des franges à 1 mHz près environ dans des conditions favorables et, sur la liaison Chilbolton-Algonquin qui fonctionne à 10 GHz, cela correspond à une précision de comparaison de 1×10^{-13} . Ce mode opératoire est donc bien adapté à des comparaisons internationales précises d'étalons primaires à césium.

2.2. *Unité de l'échelle de TAI.* - De récentes déterminations de la seconde (du SI) ont confirmé qu'elle diffère maintenant de l'unité de l'échelle du TAI de 1×10^{-12} avec des limites étroites d'incertitude. Le Rapport Annuel du B.I.H. pour 1973 reconnaît cette situation [3] mais suggère d'attendre, pour corriger cet écart, les résultats d'autres déterminations de la seconde qui sont actuellement en cours. En ce qui concerne le N.P.L., il semble probable que l'on n'aura pas de valeur définitive fondée sur NPL III avant environ un an, c'est-à-dire à la mi-1975. En revanche, deux documents présentés à cette session (CCDS/74-9 et CCDS/74-10) prévoient un ajustement prochain de l'unité de l'échelle du TAI.

Il faut aussi remarquer qu'il est également possible de réconcilier la seconde du SI et la seconde du TAI en introduisant une légère modification de 0,01 Hz dans la définition acceptée de la seconde du SI, en prenant 9 192 631 769,99 plutôt que ... 770 périodes de la radiation correspondant à la transition hyperfine, et, ce faisant, en ayant une unité de $1,1 \times 10^{-12}$ plus courte que l'unité actuelle. Cela permettrait de préserver l'uniformité de l'échelle du TAI bien qu'un tel changement de définition aurait des conséquences rétroactives sur les déterminations précises de la seconde depuis 1958. L'effet d'un tel ajustement ne serait pas appréciable en ce qui concerne l'exactitude spécifiée des étalons commerciaux.

2.3. *Accord avec le TE.* - Le C.C.D.S. a été invité par

l'Union Astronomique Internationale à prendre les mesures nécessaires pour faire concorder les indications du TE et celles du TAI. Si l'on en accepte la nécessité, il semblerait souhaitable de changer la définition de l'origine du TAI de la quantité appropriée, soit 32 s. En principe, il serait satisfaisant que le TAI soit approximativement relié au TE aussi bien pour sa marche que pour son origine, si dans un proche avenir on doit utiliser ces deux échelles indifféremment. A très longue échéance aussi, un tel accord initial est convenable si l'on veut essayer de déterminer dans quelle mesure diffèrent un système horaire atomique et un système horaire gravitationnel.

BIBLIOGRAPHIE

1. ESSEN (L.), DONALDSON (R.W.), HOPE (E.G.) and BANGHAM (M.J.), Hydrogen maser work at the National Physical Laboratory, *Metrologia*, 9, N° 3, 1973, pp. 128-137.
2. LEGG (T.H.), BROTON (N.W.), FORT (D.N.), YEN (J.L.), BALE (F.V.), BARBER (P.C.) and QUIGLEY (M.J.S.), Long baseline interferometry of the Seyfert Galaxy 3C84, *Nature*, 244, 1973, pp. 18-19.
3. Bureau International de l'Heure, Rapport Annuel pour 1973, A-13, Exactitude du TAI.

(1^{er} juillet 1974)

ANNEXE S 18

Contribution de l'I.E.N. (Italie) pour la 7^e session du C.C.D.S.

(Traduction du Document CCDS/74-20)

1. RECHERCHES SUR LES ÉTALONS PRIMAIRES

Comme on l'a dit dans un rapport antérieur, on travaille à l'Université de Pise sur l'utilisation de la transition de structure fine $3P_0 - 3P_1$ du magnésium comme base pour un étalon primaire de fréquence. Les principales caractéristiques d'un tel étalon ont été décrites précédemment [1].

On a déjà expérimenté avec succès le jet atomique. Une mesure préliminaire de la durée de vie du niveau $3P_1$ a donné comme résultat $(2,8 \pm 0,2) \times 10^{-3}$ s [2].

Des travaux sont en cours pour déceler la résonance.

2. RÉPONSES AU DOCUMENT CCDS/74-8

Point a

Le saut proposé de 32 secondes ne semble pas avantageux car la différence actuelle entre les échelles TE et TAI est constante et le passage de l'une à l'autre est immédiat.

En revanche, on peut noter quelques inconvénients :

1. on doit introduire et définir une nouvelle "échelle atomique internationale" ;
2. on ne peut abandonner le TAI actuel, à cause de la large

utilisation qui en est faite dans le monde entier ;
3. on doit expliciter des relations entre la nouvelle "échelle atomique internationale" et les autres échelles, ce qui aura des conséquences dans la nomenclature.

Point b

Le UTC sert déjà de base pour la diffusion de l'heure normale dans de nombreux pays, y compris l'Italie. Le C.C.D.S. devrait faire une déclaration recommandant l'adoption du UTC aussi dans les autres pays.

Point c

On reconnaît que le symbole UT devrait être modifié. On propose de le remplacer par TT (temps terrestre).

(juin 1974)

BIBLIOGRAPHIE

1. STRUMIA (F.), A proposal for a new absolute frequency standard, using a Mg or Ca atomic beam, *Metrologia*, 8, N° 3, 1972, pp. 85-90.
 2. STRUMIA (F.) and al., Mg frequency standard : optimization of the metastable atomic beam. 28th Frequency Control Symposium, 1974.
-

ANNEXE S 19

Datation en jours atomiques

Par A. ORTE

Instituto y Observatorio de Marina (Espagne)

(Traduction du Document CCDS/74-21)

La DJ est le résultat du comptage des révolutions de la Terre, mais non une réelle échelle de temps. Ce nombre est d'un grand intérêt pour les astronomes et pour d'autres, mais il n'est pas pratique pour la métrologie.

Dans les conventions actuelles de nos calendriers, les mois et les années sont commodes pour la vie quotidienne mais inappropriés pour les mesures.

On peut éviter les inconvénients ci-dessus des références à long terme existantes en instituant un comptage, semblable au comptage de DJ (ou MJD), dans lequel le jour est un multiple de l'unité de temps. Ce compte atomique que nous appelons "Date Atomique" (DA, JA, MJD/TAI ... ?) est défini comme suit :

"A 0 h (UTC) de MJD 41317 (1^{er} janvier 1972) correspond 10 s (ou 10 s + 32 s)* de DA 41317. La DA résulte en général de l'addition ou de la soustraction de jours (atomiques) à ce nombre".

Notes

* La définition adoptée pour DA dépend du changement éventuel du TAI de + 32 s.

1. Une définition antérieure des multiples de la seconde : minute, heure et jour est nécessaire.

2. Quand on date en DA, on doit éviter d'employer des fractions décimales du jour.
3. A l'avenir, l'équivalence sera simple entre les dates exprimées en DA + TAI et les dates qui se réfèrent à MJD + UTC.
4. La DA n'a aucun sens pour les dates antérieures à ... (à spécifier par le B.I.H.).

(4 juillet 1974)

ANNEXE S 20

**Lettre de G. A. Wilkins (R.G.O.)
au Président du C.C.D.S.**

(Traduction du Document CCDS/74-22)

Groupe de travail sur les échelles de temps

Comme je ne serai pas présent aux discussions du C.C.D.S. sur les échelles de temps, je vous envoie mes commentaires sur la lettre que le Dr Winkler et le Dr Duncombe vous ont adressée le 5 juin au sujet du rapport de Mr H.M. Smith. A mon avis, les opinions au sein du Groupe de travail étaient beaucoup plus équilibrées qu'ils ne le suggèrent et il était normal que Mr Smith vous suggère des recommandations qu'il considérerait comme devant pouvoir être acceptées par tout le monde.

Je regrette que l'U.A.I. ait, une fois de plus, voté une résolution se rapportant au temps des éphémérides sans s'assurer que la question avait été convenablement discutée auparavant. J'avais diffusé mes suggestions d'un changement dans le TE avant les réunions de Sydney l'an dernier, mais il n'était pas dans mes intentions qu'une décision soit prise sur cette question à Sydney. L'autre suggestion d'effectuer un saut dans le TAI a été faite pour la première fois à Sydney, où la participation était très limitée. Quand la résolution en question a été soumise à la Commission 4 par correspondance, on a donné seulement les raisons astronomiques en faveur de la résolution sans indiquer du tout que les utilisateurs du TAI (y compris le Jet Propulsion Laboratory) avaient des raisons pour s'opposer à un tel changement. J'aimerais aussi souligner que le rapport du Dr Markowitz du 30 avril 1974 (Annexe S 2)

peut être compris comme impliquant qu'il faut prendre ma proposition (décrite à son point 1.2) simplement comme une conséquence du changement du TAI et non comme une autre solution. Je vous serais donc reconnaissant si vous vouliez bien faire remarquer que je n'appuie pas la proposition de modifier le TAI et que certains membres du groupe de travail de l'U.A.I. sur les unités et les échelles de temps ne sont même pas convaincus que le concept de TE doive être conservé. La recommandation selon laquelle le UTC doit changer de nom pour devenir le "temps international" semble avoir l'appui d'au moins quatre membres du groupe de travail. De mes propres entretiens avec des personnalités de professions et de pays divers, il ressort qu'un tel changement aurait de bonnes chances d'être accepté de façon générale, alors que le nom impropre et lourd de "temps universel coordonné" ne remplacera probablement pas "Greenwich Mean Time" dans les publications courantes en anglais comme les horaires internationaux.

Je vous prie de m'excuser pour le retard apporté à vous adresser ces commentaires, mais j'espère qu'ils vous aideront.

(4 juillet 1974)

Rapport sur les étalons primaires de fréquence en Amérique du Nord et en Europe

Par H. HELLWIG

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

(Traduction du Document CCDS/74-24)

Depuis l'apparition, en 1948, des étalons de fréquence fondés sur l'électronique quantique, on a effectué des recherches sur une grande variété d'appareils, de techniques et de méthodes différents. Les étalons les plus avancés sont fondés sur l'atome de césium. C'est vers 1950 que l'on a mis au point des étalons ou des horloges à résonance hyperfine du césium, la première horloge ayant fonctionné en 1955 au N.P.L. (Grande-Bretagne). L'amélioration ultérieure de ces appareils dans de nombreux laboratoires dans le monde et l'utilisation croissante des étalons à césium pour la constitution d'échelles de temps ont conduit en 1967 à un accord international à la Conférence Générale des Poids et Mesures pour adopter la fréquence de résonance du césium pour définir la seconde. Dans une étape logique faisant suite à cet accord, on a fondé depuis 1971 les échelles de temps atomique et le temps universel coordonné sur un comptage de ces secondes définies à partir du césium. Des approximations des échelles de temps qui se rapportent à la rotation de la Terre sont obtenues en ajoutant ou en retranchant des secondes à certaines dates spécifiées au cours de l'année, lorsque cela est nécessaire.

Les autres appareils que l'on a utilisés ou que l'on utilise actuellement comme références primaires comprennent l'oscillateur du type maser à hydrogène qui a atteint une

certaine perfection technique et que l'on utilise effectivement dans plusieurs laboratoires comme référence primaire de fréquence ainsi que pour la constitution d'une échelle de temps. Les autres appareils prometteurs sur lesquels on a fait ou on est en train de faire des recherches comprennent les tubes à jet utilisant l'atome de thallium, la molécule d'oxyde de baryum ou l'atome de magnésium. On étudie aussi des appareils à stockage d'ions utilisant le mercure ou le baryum, et bien entendu des dispositifs fonctionnant dans la région infrarouge et visible du spectre électromagnétique et comportant des lasers asservis sur des résonances de molécules comme le méthane, l'iode, l'hexafluorure de soufre. Les principaux laboratoires engagés dans la recherche, la mise au point et la conservation des étalons primaires de fréquence sont le N.P.L. (Royaume-Uni), la P.T.B. (Allemagne Fédérale), le Laboratoire de l'Horloge Atomique (France), le N.R.C. (Canada), le N.R.L.M. (Japon), l'I.E.N. (Italie), le N.S.L. (Australie) et le N.B.S. (Etats-Unis d'Amérique). En plus des travaux effectués dans ces laboratoires, des travaux appréciables ont été faits dans d'autres organismes gouvernementaux et dans des universités de divers pays, tels que le Jet Propulsion Laboratory, la National Aeronautic and Space Administration, l'Université Harvard, l'Université Laval, l'Université de Paris, l'Université de Pise et bien entendu dans des sociétés industrielles, comme Ebauches S.A., Hewlett-Packard Co., Frequency Electronics et bien d'autres.

ÉTAT ACTUEL DES ÉTALONS PRIMAIRES DE FRÉQUENCE

I. Césium

A l'heure actuelle il existe trois étalons primaires à jet de césium, de type laboratoire, en fonctionnement à la P.T.B. (Allemagne), au N.R.C. (Canada) et au N.B.S. (Etats-Unis d'Amérique). Pour ces étalons, on a évalué l'influence de la plupart des paramètres qui affectent leur fréquence de sortie ; on a par exemple fait des expériences et des études théoriques qui donnent des renseignements sur les effets qui écartent la fréquence de sortie de la fréquence de résonance atomique non perturbée. L'exactitude que l'on attribue alors aux étalons est une combinaison statistique des incertitudes liées à ces effets. Ces trois tubes à jet ont été construits indépendamment ; ils sont de conception notablement différente et les méthodes d'évaluation sont très différentes bien que l'on évalue les

mêmes paramètres. Très récemment, on a fait une comparaison entre les fréquences de sortie corrigées de ces trois étalons primaires en utilisant l'Echelle de Temps Atomique International (TAI) comme référence commune : les fréquences corrigées de ces trois étalons concordent entre elles à mieux que 2×10^{-13} près. Chaque laboratoire avait préalablement et indépendamment annoncé aussi une exactitude d'environ 2×10^{-13} . La fréquence diffère d'environ 1×10^{-12} de la fréquence courante correspondant au TAI. En conséquence, nous pouvons en déduire qu'actuellement la marche du TAI est trop rapide, par rapport à la définition de la seconde, de 1×10^{-12} environ.

Des étalons de fréquence à jet de césium de conception semblable sont en voie d'achèvement et d'évaluation au Japon et au Royaume-Uni. A côté de la façon traditionnelle de construire un appareil à jet de césium spécial, généralement long, pour être en mesure d'en évaluer les erreurs, on a mis au point de nouvelles techniques dont on a démontré qu'elles permettent une évaluation de la plupart des étalons à jet de césium existants, qu'ils soient ou non conçus pour cette évaluation, y compris les tubes à jet commerciaux. On pense qu'une évaluation des tubes à jet existants sera possible avec des exactitudes d'environ 5×10^{-13} . Ainsi, un beaucoup plus grand nombre de laboratoires pourraient rejoindre le club des laboratoires qui possèdent des étalons primaires de fréquence à la condition qu'ils accomplissent certains contrôles électroniques avec les étalons à jet de césium existants. Cela pourrait accroître la confiance dans la valeur de la fréquence non perturbée du césium.

II. Dispositifs à hydrogène

On étudie le maser à hydrogène depuis 1960. On en a fait l'un des oscillateurs les plus stables ; sa stabilité pour des temps de mesure de l'ordre de une heure, environ 5×10^{-15} , dépasse celle du césium mais elle demeure moins bonne pour des temps de mesure dépassant de beaucoup une journée (avec le césium on obtient 2×10^{-14}). En d'autres termes, l'utilité actuelle des oscillateurs du type maser à hydrogène consiste à fournir des mesures extrêmement précises de durées relativement courtes, mais leurs qualités en tant qu'horloges sont encore inférieures à celles des tubes à jet de césium. L'exactitude du maser à hydrogène est essentiellement limitée par l'incertitude sur la connaissance du décalage de fréquence produit par la collision des atomes d'hydrogène avec les parois du ballon de

stockage utilisé à l'intérieur de la cavité à micro-ondes. Plusieurs laboratoires (N.B.S., N.R.C., N.P.L.) ont montré que les méthodes traditionnelles d'évaluation donnent une exactitude d'environ 1×10^{-12} , ce qui est considérablement moins que ce que l'on peut maintenant obtenir avec les étalons de laboratoire à jet de césium. Ces méthodes sont fondées sur l'utilisation d'une série de ballons de stockage de dimensions différentes dans le même maser à hydrogène. Du point de vue pratique, cette méthode présente un inconvénient : elle ne permet pas d'effectuer facilement des contrôles de routine de l'exactitude d'un dispositif donné car on doit interrompre le fonctionnement pendant une durée notable pour toute réévaluation.

III. Autres dispositifs

On a mis au point et on a essayé des tubes à jet atomique fonctionnant avec des atomes de thallium. Les exactitudes sont comparables à celles des dispositifs à césium. Du point de vue de leur fonctionnement de routine, ils sont très proches des tubes à jet de césium. D'après ces travaux on peut conclure que l'utilisation d'un atome aussi semblable au césium que l'atome de thallium ne conduit pas à des dispositifs en quoi que ce soit supérieurs au tube à jet de césium. En fait, pour certains aspects du fonctionnement pratique, un tel tube à jet est inférieur aux tubes à jet de césium. En conséquence, à notre connaissance, aucune recherche n'est actuellement faite sur les dispositifs à thallium.

On a envisagé d'autres dispositifs à jet atomique tels que des dispositifs à oxyde de baryum ou à magnésium ; on les a essayés ou on est en train de le faire. Certains indices font penser que ces dispositifs peuvent être intéressants mais il est nécessaire de poursuivre les recherches.

On a proposé et essayé expérimentalement, avec des résultats très encourageants, d'utiliser l'atome d'hydrogène dans des dispositifs autres que l'oscillateur maser à hydrogène. On a proposé depuis longtemps des dispositifs à stockage d'ions, dans lesquels les atomes chargés sont confinés par des champs électromagnétiques et on a fait des recherches assez étendues sur ces dispositifs. Récemment, on a effectivement construit à titre expérimental des étalons de fréquence utilisant le stockage d'ions ; ils sont actuellement à l'essai. L'utilisation du mercure ou du baryum présente des aspects prometteurs. On ne dispose pas pour le moment de résultats expérimentaux sur leurs possibilités.

L'ensemble des lasers stabilisés, dans lesquels on utilise des résonances moléculaires pour asservir un oscillateur laser sur une fréquence fixe, ont été essayés au cours des quatre dernières années avec un notable succès expérimental quant à la stabilité et quelques promesses quant à l'exactitude. Les dispositifs actuels ne fonctionnent pas avec une exactitude meilleure que 1×10^{-11} . Toutefois, il semble que l'on ne connaisse aucune limite physique réelle jusqu'à 10^{-14} . Les raies les plus prometteuses sont celles du méthane. Dans la pratique, l'inconvénient de ces dispositifs optiques est bien entendu la difficulté d'obtenir des "tops" de seconde précis. Il est par conséquent nécessaire de continuer à raffiner les méthodes de multiplication de fréquence depuis la région des micro-ondes jusqu'à celle des rayonnements infrarouges et visibles, tant en ce qui concerne la précision que la perfection technique.

PERSPECTIVES D'AVENIR DES ÉTALONS PRIMAIRES DE FRÉQUENCE

Pour plusieurs années encore, on peut supposer avec certitude que les tubes à jet de césium demeureront la base de la définition légale de la seconde ainsi que la source pratique pour la production des échelles de temps et de l'unité d'intervalles de temps. Il est vraisemblable que dans le courant des toutes prochaines années il y aura, dans les dispositifs à césium, de nouvelles améliorations qui pourront pousser l'exactitude dans la région de 10^{-14} . Ces améliorations des dispositifs seront fondées sur de nouvelles conceptions qui permettront une évaluation plus rapide et plus facile de la plupart des déplacements de fréquence significatifs ainsi qu'une amélioration de la stabilité ; celle-ci permettra la mise en oeuvre de méthodes d'évaluation et de mesure plus rapides. Il sera difficile que, dans un avenir prévisible, un autre dispositif surpasse en exactitude l'appareil à jet atomique de césium. Ainsi, pour les dispositifs pratiques, nous pouvons être certains qu'au cours des cinq prochaines années environ les dispositifs à jet de césium demeureront les pièces maîtresses dans les laboratoires d'étalons primaires de fréquence et de temps. Nous pouvons aussi être certains que pendant les dix prochaines années l'appareil à jet de césium demeurera la base de la définition légale de la seconde.

Si l'on regarde l'exactitude comme ligne directrice essentielle, les appareils à jet semblent être les dispositifs de

choix, car ils constituent la meilleure approximation de l'idéal : atome libre, non perturbé. En revanche, les dispositifs à stockage tels que ceux à hydrogène (oscillateurs masers ou tubes à jet avec stockage) souffrent de l'interaction inévitable entre l'atome et le récipient de stockage. L'avenir du maser à hydrogène comme dispositif exact dépend de façon cruciale de meilleures méthodes d'évaluation. A l'heure actuelle, fort peu de travaux sont effectués dans cette direction. L'effort le plus notable est concrétisé par le maser de grandes dimensions à ballon de stockage avec un rapport surface/volume variable de ce ballon de stockage. Il est dans les intentions d'au moins trois autres laboratoires d'entreprendre des recherches sur les dispositifs à hydrogène dans le but de mesurer l'effet de paroi en utilisant des techniques nouvelles. A cet égard, les dispositifs à jet d'hydrogène avec ou sans stockage semblent être intéressants car ils offrent la possibilité d'employer des techniques connues plus faciles (et, nous l'espérons, plus précises) que l'oscillateur maser. Dans les deux années qui viennent, on peut attendre de nouveaux résultats dans cette direction et l'on atteindra vraisemblablement au cours des cinq prochaines années des exactitudes comparables à celles des étalons actuels à jet de césium.

On en est à la phase initiale d'étude des dispositifs à stockage d'ions quant à leur aptitude comme étalons de fréquence. Là encore, on peut attendre les premiers résultats expérimentaux dans le courant des deux prochaines années. Dans les dispositifs à stockage d'ions, cependant, il est difficile de connaître avec précision la vitesse des ions stockés, donnée qui est cruciale pour évaluer l'effet Doppler du second ordre. Il est aussi nécessaire d'améliorer le nombre des particules stockées dans le piège de stockage d'ions pour que ce dispositif puisse entrer en concurrence avec les dispositifs à hydrogène ou à césium.

Les dispositifs à laser sont bien entendu prometteurs et font l'objet de recherches dans un nombre croissant de laboratoires dans le monde. En ce qui concerne les applications comme étalons primaires de fréquence, la valeur de ces dispositifs fondés sur les lasers est étroitement liée à la multiplication de fréquence à partir de la région des micro-ondes jusqu'à celle des rayonnements infrarouges et visibles. Sans multiplicateur ou synthétiseur pratique et précis ces dispositifs sont totalement inutilisables comme étalons de fréquence ou horloges au sens classique.

Là encore on peut attendre au cours des deux prochaines années de nouveaux résultats sur l'exactitude et les possibilités futures des techniques de multiplication, ce qui permettra une évaluation plus définitive des possibilités des dispositifs fondés sur les lasers. Ils sont bien entendu, de plein droit, de grand intérêt comme étalons secondaires de fréquence et comme références de longueur d'onde pour le domaine optique. L'état actuel des procédés de multiplication est fort loin de ce que nous pourrions considérer comme dispositifs pratiques. Tant qu'on a besoin d'une chaîne complète d'oscillateurs lasers intermédiaires de stabilité marginale pour relier ces dispositifs à la région des micro-ondes et tant qu'on ne peut atteindre la région du visible de façon commode, nous ne devrions pas penser sérieusement à fonder les étalons primaires de fréquence sur des étalons optiques. De plus, les résultats expérimentaux actuels, selon lesquels on obtient une exactitude de l'ordre de 1×10^{-11} , sont de deux ordres de grandeur inférieurs à ce que l'on peut faire avec les étalons à jet de césium.

En liaison avec de nouveaux progrès dans la multiplication de fréquence à partir de la région des micro-ondes, les dispositifs à jet reprennent leur intérêt car ce sont eux qui approchent le mieux l'idéal de l'atome libre et non perturbé. Ainsi, les dispositifs à jet dans l'infrarouge lointain ou même à des fréquences plus élevées peuvent présenter un grand intérêt. On peut trouver des sources spectralement pures et avec une excitation commode qui s'accordent à des transitions commodes, du magnésium ou du calcium par exemple.

RÉSUMÉ

On peut prédire que dans le courant des deux prochaines années on réalisera des exactitudes meilleures que 1×10^{-13} avec des dispositifs à césium. Le césium demeurera la pièce maîtresse parmi les étalons primaires de temps et de fréquence pendant de nombreuses années encore. Les dispositifs à jet, y compris ceux à jet de césium mais aussi ceux à jet d'autres atomes, ont même les plus grandes chances d'atteindre des exactitudes encore meilleures. Les dispositifs à stockage comme ceux qui sont fondés sur l'hydrogène, ou les cellules de stockage comme celles qui sont utilisées pour la stabilisation des lasers, ont la possibilité d'égaliser ou même de surpasser le césium et doivent par conséquent être étudiés. Toutefois, il ne faut pas

attendre dans un proche avenir des résultats indiscutables qui pourraient faire abandonner le césium. Ainsi, le césium devrait rester prédominant pour une dizaine d'années encore dans le domaine qui concerne l'exactitude de la fréquence.

On peut s'attendre à ce que deux évolutions dominent ce domaine au cours des années à venir : 1) accroissement du nombre des étalons disponibles dont l'exactitude est évaluée, c'est-à-dire de nombreux laboratoires comparant au moyen du TAI leurs fréquences exactes, ainsi que disponibilité de nouvelles techniques permettant à un laboratoire de posséder plusieurs étalons et d'avoir leur évaluation ; 2) possibilité - due à de nouvelles techniques - de régler automatiquement un étalon pour qu'il demeure exact ainsi que tendance des exactitudes à devenir comparables aux valeurs de stabilité à long terme. Ainsi, les horloges en fonctionnement et les échelles de temps correspondantes pourront bien être stables et exactes de façon continue sans qu'il faille avoir recours de temps en temps à des méthodes (compliquées) d'étalonnage et d'évaluation.

ÉTAT ACTUEL DES EXACTITUDES ET PERSPECTIVES D'AVENIR

Classe de dispositifs	Exactitude		Niveau de confiance de la prévision
	Actuelle	Prévue	
Jets micro-ondes (Cs, H, Tl, BaO)	2×10^{-13}	$\leq 5 \times 10^{-14}$	95 %
Jets submillimétriques (Mg, Ca)	---	$\leq 1 \times 10^{-14}$	20 %
Oscillateurs masers (H)	1×10^{-12}	$\leq 1 \times 10^{-13}$	80 %
Jets avec stockage (H)	---	$\leq 1 \times 10^{-13}$	80 %
Stockage d'ions (Hg, Ba, He)	1×10^{-9}	$\leq 1 \times 10^{-12}$	5 %
Lasers stabilisés (CH ₄ , I ₂ , CO ₂ , SF ₆ , etc.)	1×10^{-11}	$\leq 5 \times 10^{-14}$	20 %

ANNEXE S 22

Mémorandum pour le Groupe de travail du C.C.D.S.

Par G. M. R. WINKLER

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

(Traduction du Document CCDS/74-26)

1. *Le problème du calendrier*

Je crois avoir compris que les questions concernant les dénominations relatives au calendrier et au temps sont à l'origine de la création du Groupe de Travail et doivent être étudiées en priorité.

Dans leur Résolution 2 (2^e considérant) d'août 1973, les Commissions 31 et 4 de l'U.A.I. ont souligné la nécessité de maintenir toutes les dénominations courantes du calendrier et du temps. Nous devons simplement permettre de conserver les habitudes actuelles à moins que nous ne désirions entraîner sans nécessité le C.I.P.M. dans des controverses embrouillées et particulièrement violentes. Ainsi que le Dr Guinot l'a déjà souligné, une différence comme TU2 - TAI implique toujours que l'on utilise le même système pour les deux échelles de temps considérées. Aucune action particulière de la part du C.C.D.S. n'est donc nécessaire.

Toutefois, d'autres problèmes se posent si l'on envisage qu'il faut continuer à se diriger vers la décimalisation et qu'il faut définir de nouveaux systèmes et de nouvelles dénominations. Nous devons éviter de laisser entrer en usage de façon spontanée ces nouveaux systèmes et ces nouvelles désignations. Les Commissions 31 et 4 de l'U.A.I. se sont préoccupées de

cette question dans leur Résolution 3 (4^e considérant) en août 1973.

Je préconise de recommander pour le TAI un décompte décimal des secondes comme choix possible pour les utilisations qui ne demandent pas de relation avec les jours.

Même si le Dr Becker et d'autres ont l'impression que pour le moment un tel système n'a pas de nécessité pratique, je pense qu'il serait opportun d'en donner maintenant une définition. L'expérience m'a montré que le décompte décimal des secondes à l'U.S. Naval Observatory est utile, tout en jouant le rôle de "calmant" pour tous ceux qui veulent tout décimaliser.

2. *Modifications du TAI proposées par l'U.A.I.*

Les Commissions 4 et 31 de l'U.A.I., dans leur Résolution 2 (août 1973) ont recommandé qu'un "changement" de + 32 s soit introduit dans le TAI.

On peut effectuer le "changement" du TAI soit au moyen d'un saut unique, soit en redéfinissant le TAI. Les Commissions 31 et 4 n'étaient pas d'accord sur la méthode et désiraient laisser la décision au C.C.D.S. Le Dr Guinot et moi-même préconisons une nouvelle définition. Pour l'instant, seuls les organismes qui conservent le temps et un tout petit nombre d'utilisateurs (par exemple le Jet Propulsion Laboratory) seront concernés. Les gros avantages du changement proposé seront les suivants :

a) Une nouvelle définition du TE, qui pourra être étroitement relié au TAI, sera grandement simplifiée. Il faut encourager une telle définition.

b) Le TAI sera fourni avec un antécédent (le temps des éphémérides) qui lui manque maintenant. Cela affecte toutes les études précises de chronologie, la rotation de la Terre, la mécanique céleste, etc.

Le Dr Becker a avec raison souligné qu'une nouvelle définition du TAI pourrait justifier un changement simultané de son nom. Je ne le préconise pas. Toutefois, si d'autres y tiennent absolument, je serais prêt à les suivre car je peux voir certains avantages qui contrebalancent les inconvénients pratiques d'un tel changement, à la condition que l'on choisisse un nom significatif. Je ne peux m'empêcher d'avoir l'impression que "TT" serait significatif mais dans le mauvais sens. Ne voulons-nous pas supprimer la référence à la rotation de la Terre ? Nous avons lu tant d'explications du fait que le

temps "terrestre" n'est pas uniforme, etc.

D'un autre côté, l'utilisation principale du TAI continuera à être liée aux éphémérides et à la mécanique céleste. Aussi, pourquoi ne pas l'appeler simplement TE ? Veuillez vous reporter à la figure 1. D'un point de vue pratique, logique et esthétique cela me plairait beaucoup.

Je conçois qu'à l'heure actuelle ma suggestion choquera beaucoup d'entre vous et soulèvera leur opposition immédiate. Mais veuillez y réfléchir dans la perspective de mes "Notes sur TE" que j'ai distribuées à Sydney.

Toutefois, pour envisager une nouvelle nomenclature, il faut attendre les résultats de la réunion de la Commission 4 de l'U.A.I., groupes de travail 1, 2 et 3, en octobre 1974, à qui incombe la définition du TE.

3. *Nomenclature*

On ne peut discuter des propositions de donner un nouveau nom à TAI qu'en liaison avec des propositions similaires concernant UTC.

Personnellement, j'ai le sentiment profond qu'il ne faudrait proposer aucun changement de nom. Je suis complètement d'accord avec les conclusions du Dr Guinot. Ce qui suit devrait seulement compléter les excellents commentaires du Dr Guinot sur ce point.

Supposons que nous changions TAI en TT et UTC en TI. Peut-on imaginer l'absurde confusion que nous occasionnerions ? Et pourquoi nous ferions-nous cela à nous-mêmes ? Pour le moment, on n'envisage aucun besoin de changement pour UTC (hormis l'accroissement de tolérance sans aucune importance). Ne devrions-nous pas attendre, pour proposer un nouveau nom, une éventuelle proposition d'un changement réel pour UTC ? Ou proposerions-nous alors encore un nouveau nom ?

Le Dr Becker a fourni quelques arguments contre "International", bien que ce fût à propos de TAI. Son argument est toutefois bien plus pertinent en ce qui concerne UTC, étant donné que nous ne prévoyons pas l'abandon des fuseaux horaires avec leurs différences d'heures ! Vraiment, le choix le plus logique d'un nouveau nom ne serait par conséquent pas TI mais TT (pour UTC!).

Notre problème est qu'il existe déjà beaucoup trop de noms en usage pour UTC (UTC, GMT, "Z", etc.) ; nous devrions vraiment nous abstenir d'en créer encore un autre. Il serait

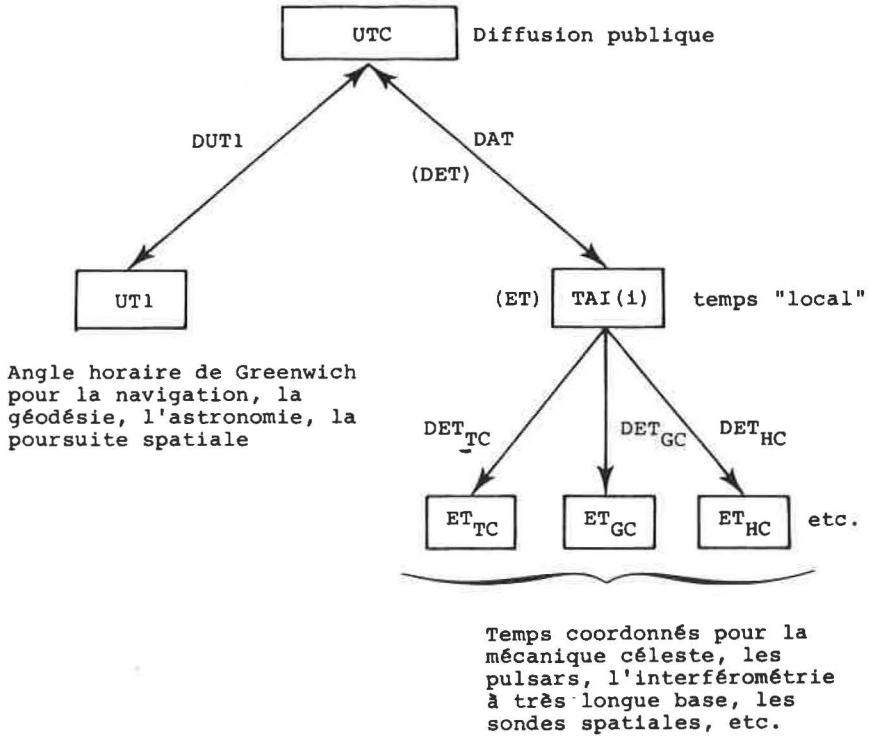


Fig. 1.- Proposition pour la famille des échelles de temps scientifiques.

particulièrement préjudiciable que deux noms changent en même temps (TAI et UTC). Par ailleurs, nous ne pouvons pas utiliser simultanément TAI et TI. En conséquence, pour le moment, on ne peut revoir que le nom de TAI. Même là je suis opposé à un changement sauf si on choisit TE (ET), ce qui serait le plus logique.

Toutefois, comme il a déjà été dit, pour envisager toute nouvelle nomenclature de ce genre, il faut attendre les résultats de la réunion de la Commission 4 de l'U.A.I., groupes de travail 1, 2 et 3, en octobre 1974, à qui incombe également une telle définition.

4. *Suppression d'échelles de temps*

Je suis convaincu que personne ne peut réellement supprimer quelque chose qui est utile. TU0 est effectivement employé (je ne suis pas d'accord avec le Dr Wilkins) ; TU1 est nécessaire pour la diffusion générale et l'utilisation en liaison avec les angles horaires. TU2 n'est pas seulement employé par le B.I.H. et les services horaires nationaux pour l'extrapolation, mais c'est aussi un outil commode pour les géophysiciens ; nous ne pouvons pas le supprimer.

5. *Heure "légale"*

La situation est beaucoup plus complexe qu'il ne paraît. Je recommande la plus grande prudence sur ce point.

Ce que nous voulons a été clairement exprimé dans les résolutions de l'U.R.S.I. et de l'U.A.I. sur ce sujet. J'ai le sentiment que le C.C.D.S. devrait aussi recommander : "Que tous les pays devraient avoir leurs signaux horaires étalons dans le système UTC". Je souligne le mot "système" car nous ne voulons pas seulement le même UTC mais aussi le même TU1 (dans les limites de l'intérêt pratique, à grande échelle). En vérité, nous voulons également les systèmes normalisés de codage, tels que le C.C.I.R. les a déjà recommandés. Je crains beaucoup qu'une recommandation trop étroite, comme proposé par le Dr Barnes, le Dr Becker, etc., ne mette rapidement en danger l'intégrité de ce système de distribution de l'heure que nous avons eu tant de mal à mettre sur pied. Il y a des points complémentaires, particuliers aux diverses situations nationales, que je préfère traiter oralement.

Toutefois, à ce propos, il existe encore un autre point pour lequel la normalisation et la reconnaissance officielle

seraient tout à fait les bienvenues. C'est la désignation des fuseaux horaires tout autour du globe. Comme beaucoup d'entre nous le savent, la désignation des fuseaux horaires au moyen d'une lettre de code est très répandue dans les communications mondiales. Ce système n'est pas officiel. L'absence de recommandations officielles a permis l'existence d'heures fantaisistes (voir H.O. 5192 ou Annuaire du Bureau des Longitudes, 1973, "Temps légaux sur le Globe"). Une recommandation officielle du C.I.P.M. au sujet d'un système commun de désignations mondiales serait tout à fait opportune. Je recommande le code alphabétique A-Z, simple et très employé, tel qu'on le trouve au début du document H.O. 5192. Il pourrait être revu en y incorporant "J" pour la zone horaire de + 13 heures* en Sibérie orientale. Le système ne vise qu'à fournir le cadre à l'intérieur duquel les pays peuvent désigner leurs zones horaires légales. Une recommandation de ce genre aiderait à éviter les décalages de 1/2 heure ou même moins et contribuerait notablement à améliorer l'uniformité dans les usages relatifs à l'heure.

(28 janvier 1974)

* - 13 heures selon la convention utilisée dans le document H.O. 5192.

ANNEXE S 23

Changement du TAI de 32 s

Par R. L. DUNCOMBE

Nautical Almanac Office, U.S.N.O. (États-Unis d'Amérique)

(Traduction du Document CCDS/74-27)

Lors de la 15^e Assemblée Générale de l'Union Astronomique Internationale à Sydney en août 1973, les Commissions 4 et 31 ont adopté une résolution concernant le TAI (voir annexe, point I). Aux termes du compte rendu officiel de la Commission 4, son Président devait rassembler les opinions des membres de la Commission au sujet de l'opportunité de modifier la définition du TAI, ou d'introduire ultérieurement un saut de 32 secondes exactement.

En réponse à cette demande, une lettre circulaire a été envoyée à tous les membres de la Commission 4 ; elle exposait en détail quelques raisons de changer le TAI et deux suggestions quant à la façon dont on pourrait introduire le changement (voir annexe, point II). Sur les 33 membres de l'U.A.I. qui font normalement partie de la Commission 4, 19 ont fourni des réponses donnant leurs opinions sur ce sujet. Parmi ces réponses, 16 étaient en faveur de la résolution et 3 étaient contre. Dans une lettre personnelle, le Dr Kovalevsky a indiqué que tous les membres de la Commission présents à Sydney avaient voté en faveur de la résolution. Comme il n'est pas certain que j'aie reçu les réponses de tous les membres de la Commission 4 qui étaient présents à Sydney, nous devons considérer que le nombre des membres de la Commission favorables à cette résolution peut être quelque peu supérieur à ce qui est

indiqué ici. Bien que tous ceux qui ont répondu se soient prononcés pour ou contre la résolution, ils n'ont pas tous précisé leur choix pour la mise en oeuvre. Finalement, parmi ceux qui ont effectivement précisé un choix, les opinions sont partagées : 6 indiquent une préférence pour une avance rétroactive de 32 s de l'origine du TAI, tandis que 9 indiquent une préférence pour l'introduction future d'un saut de 32 secondes dans l'échelle de TAI.

En résumé, la majorité de ceux qui ont répondu sont favorables à la résolution, mais les opinions sont partagées quant à la manière de la mettre en oeuvre.

Note. Un certain nombre de ceux qui ont répondu ont exprimé l'opinion que le paragraphe (c) de la Résolution 2 de l'U.A.I., Commissions 4 et 31, devrait se lire ... meilleur accord ..., puisque TE et TAI ne diffèrent pas exactement de 32 s.

Annexe au Document CCDS/74-27

I. *Raisons de changer*

A. Tel qu'il est normalement défini, TE n'est plus acceptable comme argument des éphémérides, bien qu'il convienne de retenir le concept de TE en principe.

1. On ne peut mesurer TE avec une précision suffisante pour l'usage pratique.
2. La détermination de TE à partir de la Lune est incohérente avec la définition de TE, à cause de l'accélération de la Lune due aux marées.
3. Les erreurs connues de l'échelle de TE telle qu'on l'utilise normalement peuvent être très grandes - peut-être supérieures à $50 T^2$ secondes, avec T exprimé en siècles.
4. TE, tel que la théorie du Soleil de Newcomb en définit le concept, n'est ni uniforme ni pratique, parce que :
 - a) la définition n'a de sens que dans le cadre de la théorie du Soleil de Newcomb et ne peut être adaptée sans ambiguïté importante à aucune nouvelle théorie ;
 - b) toute valeur non nulle de G impliquerait un changement séculaire de la durée de la seconde de TE ;

c) de petites modifications dans le système des constantes astronomiques adopté entraînent d'importantes discontinuités dans les échelles de TE et peuvent même modifier la signification de la définition de TE.

B. Raisons pour lesquelles TAI, tel qu'il est défini actuellement, n'est pas acceptable comme argument des éphémérides.

1. Si nous adoptons TAI à partir de 1980, pour les éphémérides futures seulement, nous ne résolvons pas notre problème pour les éphémérides antérieures à 1980, et en outre nous introduisons une discontinuité dans les éphémérides.
2. Si nous adoptons TAI de façon rétroactive, nous avons une discontinuité de 32 s par rapport aux éphémérides actuelles, ce qui nécessitera de refaire de nombreux calculs (en particulier pour l'éphéméride lunaire) avec, en fin de compte, peu d'avantages pratiques.

II. Deux solutions

A. Redéfinir TAI de façon rétroactive en avançant son origine de 32 s.

B. Introduire un saut de 32 s dans l'échelle de TAI à une date future, par exemple 1980.

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE 7^e Session (1974)

	Pages
Notice historique sur les organes de la Convention du Mètre	v
Liste des membres	vii
Ordre du jour	x
Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par B. Guinot	S 1
Introduction du président	2
Progrès des étalons atomiques de fréquence et des horloges atomiques; travaux effectués dans les laboratoires (L.H.A., R.R.L. et N.R.L.M., P.T.B., U.S.N.O., N.B.S., N.P.L., N.R.C., I.E.N. et Université de Pise, L.S.R.H.) ..	2
L'échelle de Temps Atomique International (TAI): Méthode de calcul élaborée par le B.I.H.; commentaires sur les travaux du B.I.H. et de quelques laboratoires. Adoption de la Recommandation S 5 pour la prise en considération d'étalons de fréquence et d'horloges autres que les horloges à césium	5
Méthodes de comparaison de temps aux distances intercontinentales: Précautions à prendre dans l'utilisation du Loran-C; précision des diverses méthodes (comparaison par transport d'horloges, liaisons par satellites et par radiointerférométrie). Adoption de la Recommandation S 3 relative à l'amélioration des comparaisons internationales de temps et de fréquence.....	7
Exactitude de l'intervalle unitaire d'une seconde du TAI: Discussion sur l'opportunité d'un ajustement, par saut de fréquence, de l'intervalle unitaire du TAI qui est actuellement trop court de 1×10^{-12} en valeur relative; application possible d'un « pilotage » en fréquence. Adoption de la Recommandation S 4 relative à l'amélioration de l'exactitude du TAI en maintenant sa stabilité	8
Rapport du Groupe de travail chargé d'examiner les conséquences de la Recommandation S 2 (1972):	
Discussion sur l'opportunité d'apporter une correction de 32 s au TAI; adoption de la Recommandation S 2 informant l'U.A.I. de la position du C.C.D.S. à ce sujet.....	9
Base des temps légaux: Recommandation S 1 invitant la C.G.P.M. à recommander l'adoption de l'UTC comme base du temps officiel dans tous les pays	11

Désignation des échelles de temps: Temps Atomique International (maintien du nom et du symbole TAI); Temps Universel Coordonné (discussion des nouvelles désignations proposées; adoption de la désignation « Temps Universel (Coordonné) »; le C.C.D.S. souhaite que soient adoptés dans toutes les langues les symboles UTC pour le Temps Universel (Coordonné) et UT pour le Temps Universel)	11
Élargissement des tolérances de l'UTC	13
Informations sur la valeur de la vitesse de la lumière (Travaux du C.C.D.M. (1973) concernant la valeur de c (299 792 458 m/s) et perspectives d'une éventuelle redéfinition du mètre)	13
Recommandations présentées au Comité International des Poids et Mesures :	
<i>Recommandation S 1</i> (1974) (Le Temps Universel (Coordonné) comme base du temps officiel dans tous les pays)	14
<i>Recommandation S 2</i> (1974) (Différence entre le Temps des Éphémérides et le Temps Atomique International).....	15
<i>Recommandation S 3</i> (1974) (Amélioration des comparaisons internationales de temps et de fréquence)	16
<i>Recommandation S 4</i> (1974) (Amélioration de l'exactitude du Temps Atomique International)	16
<i>Recommandation S 5</i> (1974) (Progrès futurs du Temps Atomique International par l'emploi de nouveaux étalons)	17

Annexes

S 1. Documents de travail présentés à la 7 ^e session du C.C.D.S.....	18
S 2. U.A.I. — <i>Emploi du TE et du TAI</i> , par W. Markowitz.....	22
S 3. Instituto y Observatorio de Marina (Espagne). — <i>Diffusion de l'intervalles unitaire, du hertz et de leurs multiples à partir de l'Échelle de Temps Atomique International</i> , par A. Orte	26
S 4. B.I.H. — <i>Note sur l'exactitude du temps atomique</i> , par B. Guinot.....	28
S 5. P.T.B. (Rép. Féd. d'Allemagne). — <i>Mesures de la fréquence du TAI avec l'étalon primaire à césium CS1 de la P.T.B.</i> , par G. Becker.....	32
S 6. <i>Rapport du Président du Groupe de travail sur les échelles de temps, présenté au Président du C.C.D.S.</i> , par H. M. Smith.....	33
S 7. P.T.B. (Rép. Féd. d'Allemagne). — <i>Contribution pour la 7^e session du C.C.D.S.</i> , par G. Becker	50
S 8. <i>Contribution du N.R.C. (Canada) pour la 7^e session du C.C.D.S.</i>	59
S 9. <i>Contribution du N.B.S. (États-Unis d'Amérique) pour la 7^e session du C.C.D.S.</i>	66
S 10. P.T.B. (Rép. Féd. d'Allemagne). — <i>Changement de fréquence du TAI</i> , par G. Becker	71
S 11. P.T.B. (Rép. Féd. d'Allemagne). — <i>Commentaires sur le rapport du Président du Groupe de travail sur les échelles de temps</i> , par G. Becker ..	73
S 12. <i>Étalon de fréquence à césium du N.R.L.M. (Japon)</i> , par Y. Koga, Y. Nakadan et J. Yoda	76
S 13. R.R.L. et N.R.L.M. (Japon). — <i>Rapport pour la 7^e session du C.C.D.S.</i> ..	80
S 14. Laboratoire de l'Horloge Atomique (France). — <i>Rapport pour la 7^e session du C.C.D.S.</i>	84

S 15. <i>Travaux récents sur le maser à hydrogène aux R.R.L. (Japon)</i> , par Y. Saburi, M. Kobayashi et K. Yoshimura	87
S 16. N.R.C. (Canada). — <i>Réseaux de données à large bande et TAI</i>	92
S 17. <i>Contribution du N.P.L. (Royaume-Uni) pour la 7^e session du C.C.D.S.</i> ...	93
S 18. <i>Contribution de l'I.E.N. (Italie) pour la 7^e session du C.C.D.S.</i>	97
S 19. Instituto y Observatorio de Marina (Espagne). — <i>Datation en jours atomiques</i> , par A. Orte	99
S 20. <i>Lettre de G. A. Wilkins (R.G.O.) au Président du C.C.D.S.</i>	101
S 21. N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — <i>Rapport sur les étalons primaires de fréquence en Amérique du Nord et en Europe</i> , par H. Hellwig.....	103
S 22. U.S.N.O. (États-Unis d'Amérique). — <i>Mémoire pour le Groupe de travail du C.C.D.S.</i> , par G.M.R. Winkler	111
S 23. Nautical Almanac Office, U.S.N.O. (États-Unis d'Amérique). — <i>Changement du TAI de 32 s</i> , par R. L. Duncombe.....	117

IMPRIMERIE DURAND
28600 LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1976, n° 379

ISBN 92-822-2032-X

ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 1976-02-18

Imprimé en France