

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE
SESSION DE 1972

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

COMITÉ CONSULTATIF

POUR

LA DÉFINITION DE LA SECONDE

6^e SESSION — 1972

(6-7 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 (45 520 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 physique 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 des délégués de tous les États membres de la Convention du Mètre et se réunit au moins une fois tous les six ans. Elle reçoit à chacune de ses sessions le Rapport du Comité International sur les travaux accomplis, et a pour mission :

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

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

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

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 3 000 000 de francs-or, soit environ 1 000 000 de dollars U.S.

(1) Au 31 décembre 1972, quarante et un États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne, Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, Canada, Chili, Corée, Danemark, Dominicaine (Rép.), Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Irlande, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République Arabe Unie, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, 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 réguliers; 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

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, *Paris*.

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

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

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.

* Maintenant « Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung »
[A.S.M.W.].

LABORATOIRE DE L'HORLOGE ATOMIQUE DU CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE, *Besançon, 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.
 2. Mise en pratique du Temps Atomique International (TAI).
 3. Relations et rôles respectifs du C.C.D.S. (et du C.I.P.M.), et des autres organisations s'occupant des échelles de temps.
 4. Répercussions des échelles de temps internationales sur la définition légale du temps dans divers pays.
 5. Questions diverses.
-

COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

6^e SESSION (1972)

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 6^e session au Bureau International des Poids et Mesures, à Sèvres, au cours de trois séances, les jeudi 6 et vendredi 7 juillet 1972.

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, Directeur).

Bureau des Longitudes, Paris (J. KOVALEVSKY, Astronome titulaire).

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

Conseil National de Recherches [N.R.C.], Ottawa (C. C. COSTAIN, Head, Time and Frequency Section).

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris [I.E.N.], Turin (S. LESCHIUTTA, Chargé du Département « Métrologie électromagnétique »).

Laboratoire de l'Horloge Atomique du C.N.R.S., Besançon, Orsay (M. ARDITI, Sous-directeur; C. AUDOIN, Maître de recherche).

- Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères [L.S.R.H.], Neuchâtel (Ch. MENOUD, Chef du Département « Chronométrie »).
- National Bureau of Standards [N.B.S.], Boulder (J. A. BARNES, Chief, Time and Frequency Division).
- National Physical Laboratory [N.P.L.], Teddington (A. E. BAYLEY, Superintendent, Division of Electrical Science; J. McA. STEELE, Head, Radiofrequency and Microwave Group).
- National Research Laboratory of Metrology [N.R.L.M.], Tokyo (Y. SABURI).
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt [P.T.B.], Braunschweig (G. BECKER, Leitender Direktor).
- Radio Research Laboratories, Tokyo (Y. SABURI, Chief, Frequency Standards Division).
- Royal Greenwich Observatory, Hailsham (H. M. SMITH, Chargé du Service « Time and Latitude »).
- Union Astronomique Internationale [U.A.I.] (W. MARKOWITZ).
- U. S. Coast Guard, Washington (C. E. POTTS, Ingénieur).
- U. S. Naval Observatory [U.S.N.O.], Washington (G. M. R. WINKLER, Director, Time Service Division).

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. GIACOMO, sous-directeur du B.I.P.M. et P. CARRÉ (B.I.P.M.).

Absents : Commission Nationale de l'Heure, Paris; Deutsches Amt für Messwesen und Warenprüfung, Berlin; Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques de l'U.R.S.S., Moscou.

Le *Président* ouvre la séance; après avoir souhaité la bienvenue à toutes les personnes présentes, il évoque la mémoire de H. BARRELL, décédé le 16 février 1972. H. Barrell fut président du C.C.D.S. lors des 3^e et 4^e sessions (1963 et 1967), au moment du changement de définition de la seconde; sa compétence et son amabilité lui avaient attiré l'estime et l'amitié de tous ses collègues.

Le Président propose de confier la tâche de rapporteur à Mr Guinot; cette proposition est approuvée. On passe alors à l'examen des différents points de l'ordre du jour.

1. Progrès de l'instrumentation

Mr Barnes présente les travaux accomplis au National Bureau of Standards (Boulder). Aucune détermination absolue de la seconde n'a

été effectuée depuis quelques années et la mémoire des résultats antérieurs a été conservée par l'ensemble des étalons commerciaux qui fournissent le temps atomique du laboratoire, TA(NBS). Le nouvel étalon désigné par NBS-V commencera à fonctionner durant l'automne 1972. On espère qu'il conduira à une exactitude de 1×10^{-13} . Des expériences ont été entreprises sur un étalon passif à hydrogène, mais on ne peut pas encore prédire leur valeur. Les lasers stabilisés par absorption saturée dans le méthane ont actuellement une exactitude de 1×10^{-11} ; la comparaison de leur fréquence à celle de l'étalon à césium a été effectuée; comme, en outre, la longueur d'onde de ces lasers a été comparée à celle de la lampe à krypton 86, on a mesuré la vitesse de la lumière à 1×10^{-8} près.

Mr *Costain* rappelle que l'étalon à césium Cs III de 2,1 m du Conseil National de Recherches (N.R.C.) est utilisé deux fois par semaine pour étalonner les fréquences des étalons commerciaux; TA(NRC) est la seule échelle de temps qui repose sur une détermination absolue de la fréquence. Un nouvel étalon, Cs V, est en voie d'achèvement; sa longueur d'interaction est aussi de 2,1 m; son évaluation demandera encore un an au moins et l'on espère que son exactitude sera de l'ordre de 1×10^{-13} ; il se peut qu'il soit utilisé d'une façon continue (en horloge), mais il est trop tôt pour être fixé sur ce point. Les travaux ont été poursuivis sur les masers à hydrogène; l'effet de paroi a été déterminé par l'emploi d'une série de cinq ballons de quartz, revêtus de téflon, de diamètres variant de 10 à 16 cm.

Mr *Becker* estime que le défaut d'exactitude de l'étalon à césium CS1 construit à la Physikalisch-Technische Bundesanstalt (P.T.B.) est de 4×10^{-13} ; mais ses défauts de reproductibilité sont de l'ordre de 1×10^{-13} . Un nouvel étalon à faisceau réversible, CS2, est en préparation, mais demandera encore quelques années de travail. La décision a été prise de travailler à la P.T.B. sur les lasers stabilisés et la démultiplication de leur fréquence. On est en train d'améliorer un des deux masers à hydrogène de la P.T.B. dans le but de réaliser un étalon secondaire à grande stabilité à court terme et, si possible, à long terme.

A la suite de questions qui lui sont posées par MM. Barnes et Leschiutta, Mr *Becker* précise que l'évaluation de l'exactitude de CS1, grâce à la méthode de la modulation de la vitesse des atomes, tient compte d'un déphasage possible entre les deux champs de la cavité et que les étalons à faisceau réversible ne devraient pas être supérieurs à cet égard. CS2 n'est pas conçu pour un fonctionnement continu.

Mr *Steele* présente les travaux du National Physical Laboratory (N.P.L.). Les recherches sur le maser à hydrogène sont poursuivies, notamment à cause de l'utilité de cet instrument dans les expériences de radio-interférométrie à très longue base et sur la relativité; le défaut d'exactitude est inférieur à 1×10^{-12} . D'autre part, un nouvel étalon

à césium est en cours de construction; il devrait être en service dans deux ans.

Mr *Leschiutta* expose les recherches effectuées à l'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris (I.E.N.) sur de nouveaux types d'étalons : au magnésium et à cellule au césium avec pompage optique.

Mr *Winkler*, de l'U.S. Naval Observatory (U.S.N.O.), rend compte de travaux effectués dans divers établissements des États-Unis d'Amérique. On a pu étudier à l'U.S.N.O. les nouveaux étalons à césium construits par la société Hewlett-Packard : dans une ambiance contrôlée, le défaut de stabilité n'est que 1×10^{-14} en dix jours. Les travaux sur le maser à hydrogène ont été poursuivis à l'Université Harvard, au Smithsonian Astrophysical Observatory (S.A.O.) (par Mr Vessot, en préparation aux expériences de radio-interférométrie à très longue base), à la National Aeronautical and Space Administration (N.A.S.A.) (par Mr Peters, Goddard Space Flight Center), au N.B.S. et au Jet Propulsion Laboratory (J.P.L.). Mr Peters a réussi à faire fonctionner un étalon à jet d'hydrogène qui est, par conception, exempt de l'effet de paroi. Enfin, Mr *Winkler* annonce le succès de l'expérience sur la relativité effectuée par MM. Hafele et Keating qui ont observé le décalage en temps d'horloges transportées autour de la Terre par rapport aux horloges fixes de référence; ce décalage de $- 59$ ns pour le voyage vers l'Est et de $+ 273$ ns pour le voyage vers l'Ouest est conforme à la théorie dans les limites des erreurs (± 20 ns environ).

La réalisation de l'étalon à jet d'hydrogène soulève plusieurs questions et commentaires. D'après Mr *Barnes* on peut craindre un effet de cavité; l'instrument est néanmoins très intéressant. Mr *Becker* pense que l'estimation de l'effet Doppler du second ordre est difficile car les atomes sont encore plus rapides que dans le cas de l'étalon à césium. Mr *Audoin* souligne l'intérêt qu'il y a à comparer des étalons passifs et actifs utilisant le même atome.

Mr *Audoin* annonce que le Laboratoire de l'Horloge Atomique (L.H.A.) a construit deux masers à hydrogène qui sont en fonction. La stabilité à court terme est analogue à celle des masers à hydrogène de la N.A.S.A., du J.P.L. et du S.A.O. Des comparaisons avec l'ensemble des étalons à césium de l'Observatoire de Paris sur une période de dix jours ont montré que les fluctuations de fréquence n'excèdent pas 1×10^{-13} sur cette durée. Un autre maser à hydrogène est en cours de construction, en collaboration avec le Centre National d'Études des Télécommunications, à des fins purement métrologiques; il sera lié à l'Observatoire de Paris par faisceau hertzien ou laser. D'autre part, l'étude des lasers stabilisés par le méthane a été entreprise. En réponse à des questions de MM. Barnes et Becker sur l'effet de paroi des masers à hydrogène, Mr *Audoin* expose comment on peut envisager de maintenir la température de fonctionnement à laquelle cet effet s'annule.

2. Formation du Temps Atomique International (TAI)

Mr *Guinot* expose les travaux accomplis au Bureau International de l'Heure pour améliorer la pondération des échelles de temps et propose une nouvelle méthode de calcul de TAI.

Depuis la 5^e session du C.C.D.S. (1970), le B.I.H. a continué à calculer le TAI selon les règles de « Mise en Pratique » qui avaient été énoncées. On rappelle que :

— TAI est la moyenne des TA(i) de sept laboratoires possédant au moins trois étalons à césium. Tous ces TA(i) ont reçu le poids 1, à l'exception de TA(USNO) qui a reçu le poids 2, en raison du nombre élevé de ses étalons.

— La durée de l'intervalle unitaire de TAI a été conservée aussi constante que possible, par un algorithme approprié.

— TAI est porté à la connaissance de ses usagers par la publication mensuelle de corrections aux échelles de temps locales.

Comme le B.I.H. dispose maintenant de plus de trois ans de données au niveau de précision actuel, on a pu entreprendre, suivant la Recommandation S 4 (1970), des études statistiques afin d'estimer la stabilité à long terme de TAI et, si possible, d'améliorer cette stabilité par une pondération convenable. On a pu aussi étudier la nécessité d'un recalage de la durée de l'intervalle unitaire de TAI, d'après les réalisations de la seconde du SI.

La *stabilité* à long terme de TAI a été estimée d'après les spectres de puissance des différences TAI — TA(i) (corrigées par une fonction linéaire du temps) et aussi d'après les variances d'échantillons de fréquence moyenne sur deux mois. La conclusion est que, dans la gamme des périodes de deux mois à deux ans, les échelles de temps (locales et TAI) sont affectées par un bruit de scintillation en fréquence (« frequency modulation flicker noise »). En un an, le changement probable de fréquence de TAI est de 1×10^{-13} . D'après ce qui a été dit de la stabilité de fréquence des étalons commerciaux, on se serait attendu à une meilleure stabilité de TAI et des TA(i). Il est surprenant de constater que des TA(i) établis avec le plus grand soin présentent une différence de fréquence qui a varié de presque 1×10^{-12} en deux ans.

Comme on pouvait supposer que la pondération *a priori* utilisée pour calculer TAI ne représentait pas les qualités réelles des TA(i), on a effectué plusieurs tentatives de pondération en fonction des résultats passés considérés sur un et deux ans. La stabilité ne s'est pas trouvée améliorée. On peut facilement comprendre pourquoi une pondération fondée sur les propriétés statistiques passées des échelles locales ne peut pas être recommandée, au moins pour le moment. Les TA(i) sont déjà calculés de sorte qu'ils aient la meilleure stabilité à long terme : les

irrégularités à court terme, de l'ordre de quelques mois pour fixer les idées, sont déjà filtrées. Seules subsistent les irrégularités à très long terme (au-delà d'un an, par exemple) dont l'analyse n'est pas possible durant un intervalle de trois ans. On peut s'assurer, par exemple, que si l'on prend un intervalle de deux ans et qu'on le déplace sur les trois ans disponibles, on observe des changements considérables des propriétés statistiques. Une autre raison de l'insuccès des pondérations est que les propriétés statistiques sont trop instables : elles changent avec le temps par suite des modifications de l'appareillage et des procédés de calcul. Un exemple typique (réel) est celui de l'un des laboratoires ayant cinq étalons à césium, mais qui n'en eut que deux en fonctionnement durant plusieurs mois par suite de pannes.

Cependant, lorsqu'on travaille sur les données des horloges individuelles, il est possible de pondérer avec succès, comme cela a été montré par plusieurs auteurs, au N.B.S. notamment. Au B.I.H. on a établi un algorithme qui est utilisable pour les horloges comparées par l'intermédiaire des impulsions de LORAN-C ou de télévision (ou toute autre méthode de précision analogue) et qui met l'accent sur la stabilité à long terme. Cet algorithme est fondé sur les fréquences moyennes mensuelles (ou bi-mensuelles de préférence) et il peut être utilisé pour des horloges de caractéristiques différentes et même, à la rigueur, pour une combinaison d'horloges individuelles et d'échelles de temps. Cet algorithme a été essayé sur un ensemble de huit horloges Hewlett-Packard comparées par la télévision ; on a constaté une bonne stabilité des poids affectés aux horloges ; cependant, il se produit occasionnellement des détériorations de poids, mais cela s'est toujours produit avant une panne majeure qui a nécessité une réparation de l'horloge.

Afin d'améliorer la stabilité, la proposition du B.I.H. est d'appliquer un algorithme comprenant des règles de pondération, non pas aux échelles locales, mais aux horloges individuelles. Les avantages d'un tel procédé seraient, d'après Mr Guinot, les suivants :

1. La plupart des échelles locales sont fondées sur un petit nombre d'horloges. Des irrégularités de TAI sont dues aux changements de fréquence de certains TA(i) qui ne peuvent pas être évités au niveau local, quand le nombre d'étalons en usage effectif devient inférieur à trois (ce qui arrive fréquemment). Dans un traitement global, de telles irrégularités seraient évitées.

2. Des étalons isolés peuvent être employés. Par exemple, au moins douze étalons à césium convenablement exploités et comparés aux impulsions de LORAN-C ou de télévision sont disponibles en Europe (non compris ceux des stations de LORAN-C).

3. Le traitement de tous les étalons serait uniformisé, décrit en détail et connu de tous. A présent, il est pratiquement impossible de comprendre comment TAI est calculé puisqu'il faudrait connaître les méthodes

de chaque laboratoire participant, méthodes qui ne sont pas toujours publiées.

4. Le calcul direct de TAI laisserait une entière liberté aux laboratoires pour établir leurs TA(i), d'après leurs propres critères, sans qu'ils aient à se préoccuper des critères adoptés pour TAI.

Mr *Guinot* ne s'attend à aucune difficulté de calcul. Les laboratoires pourraient envoyer au B.I.H. les moyennes sur cinq jours de leurs différences « TA(i) — horloge » [ou « TUC(i) — horloge » et TUC(i) — TA(i)]. Le B.I.H. continuerait à publier, comme il le fait à présent, les valeurs de TAI — TA(i) et TUC — TUC(i).

Cependant, même si la méthode proposée réduit sensiblement les défauts de stabilité, la dérive de fréquence de TAI ne sera pas négligeable en comparaison des défauts d'exactitude attendus des nouveaux étalons de laboratoire. Après quelques années, on peut s'attendre à ce que la dérive de TAI excède la limite d'exactitude d'un seul étalon de laboratoire. Dans ces conditions, Mr *Guinot* se demande s'il est justifié de conserver les sauts intentionnels de fréquence de TAI des règles de « Mise en pratique » de 1970. MM. Allan et Barnes, du N.B.S., ont montré, il y a quelques années, qu'il était possible d'assurer en même temps la stabilité à long terme et l'exactitude. Mr *Guinot* décrit succinctement une méthode qui ne détériore pas sensiblement la stabilité sur des intervalles de quelques années, mais qui l'améliore sur des intervalles plus longs tout en maintenant l'exactitude : en fait, l'exactitude apporte une stabilité parfaite sur un intervalle de temps infiniment long.

Les propositions de Mr *Guinot* donnent lieu à une longue et vive discussion.

Les membres du C.C.D.S. s'interrogent sur les causes des variations relatives de fréquence des TA(i). Mr *Becker*, en utilisant la reproductibilité à 1×10^{-13} près de l'étalon à césium CS1 de la P.T.B., a évalué les dérives en fréquence de chacune des échelles entre juin 1970 et mai 1972. Il est particulièrement remarquable que la dérive de l'échelle de l'U.S.N.O. soit de signe contraire à celle des autres laboratoires (sauf pour le N.R.C., mais la fréquence de ce laboratoire avait été changée intentionnellement à cause d'une évaluation nouvelle de son étalon à césium).

Aucune explication certaine ne peut être trouvée pour ces dérives, bien qu'on ait envisagé diverses possibilités comme le vieillissement des horloges dû en particulier au changement spontané du champ magnétique (Mr *Becker*), leur couplage, leur dépendance par rapport aux conditions d'ambiance. Cette discussion souligne l'intérêt des précautions prises pour assurer la meilleure stabilité et indépendance : les horloges à césium doivent être placées à l'abri des variations de température et d'humidité, à l'écart des champs magnétiques intenses ou variables, doivent être éloignées les unes des autres et même être alimentées par des batteries séparées (Mr *Winkler*). Il n'y a pas intérêt à ce que le

B.I.H. augmente le nombre d'horloges participantes, si les conditions d'utilisation ne sont pas satisfaisantes. Mr *Guinot* est bien d'accord sur ce dernier point et désire se réserver la possibilité de ne pas inclure dans ses calculs les horloges mal exploitées; une enquête sur les conditions d'emploi de chaque horloge doit précéder la mise en œuvre de la méthode de calcul d'après les horloges individuelles.

Des membres du C.C.D.S. se demandent s'il est fondé d'utiliser les données individuelles. L'objection principale, énoncée par Mr *Winkler* et soutenue par Mr *Becker*, est que le bruit introduit par les comparaisons de temps est bien plus considérable d'un laboratoire à l'autre qu'au sein du même laboratoire. Ce bruit pourrait masquer les qualités intrinsèques des futurs étalons de stabilité accrue. Néanmoins, Mr *Guinot* estime que la nature de ce bruit, qui provient d'erreurs bornées sur les différences de temps, permet tout de même d'assurer la stabilité à long terme; les effets de ce bruit pourront encore être atténués si, comme le propose Mr *Winkler*, le temps atomique n'est publié que tous les deux mois, puisque le B.I.H. pourra alors utiliser des fréquences moyennes bi-mensuelles.

A la demande de Mr *Winkler*, Mr *Guinot* précise qu'il n'envisage pas d'utiliser les données de toutes les horloges à césium commerciales et qu'il paraît raisonnable de faire contribuer au plus une centaine d'horloges bien exploitées à la formation de TAI. Il est possible d'inclure des masers à hydrogène et, d'une façon générale, toute horloge dont on peut présumer qu'elle n'a pas de dérive de fréquence. En réponse à Mr *Becker*, il rappelle que la méthode de calcul projetée permet d'accorder un poids supérieur aux étalons d'un type nouveau qui le mériteraient. Mr *Becker* demande comment une qualité très supérieure sera reconnue dans le cas d'un étalon unique puisque les moyens de comparaison feront défaut: c'est bien là un problème difficile, mais il ne peut pas être mieux résolu au niveau d'un laboratoire que dans une comparaison globale de tous les étalons.

Mr *Smith* se demande si l'on a réellement besoin d'une stabilité et d'une exactitude améliorées pour le TAI, sauf pour les recherches de certains physiciens présents à cette réunion. Aucune réponse précise ne lui est donnée, mais il semble que le rôle des physiciens et des astronomes soit de devancer les besoins techniques spécifiquement exprimés.

Plusieurs membres du C.C.D.S., dont MM. Bonanomi, Leschiutta, Steele, pensent qu'il faut donner au B.I.H. les moyens de poursuivre ses expériences et par conséquent lui fournir les données qu'il requiert sur les horloges individuelles. Cette opinion est acceptée. Mr *Winkler* demande que les formats de transmission des données soient précisés et souligne l'intérêt des envois de cartes et surtout de rubans perforés. Le *Président* invite Mr *Guinot* à établir un plan de travail du B.I.H.

pour l'amélioration du TAI. Ce plan est donné en Appendice (p. S 23). Il a été adopté par le C.C.D.S.

Une question de procédure est soulevée par Mr *Markowitz*. Par quel moyen les recommandations du C.C.D.S. peuvent-elles être transmises au B.I.H. ? Plusieurs membres estiment qu'une grande liberté doit être laissée au B.I.H. et Mr *Guinot* rappelle que cette liberté est nécessaire pour profiter au plus vite des améliorations techniques. Mr *Smith* remarque que, dans le cas présent, c'est aux laboratoires qu'on devrait recommander l'envoi des données requises par le B.I.H. et que l'on devrait seulement exprimer le vœu que le B.I.H. continue à améliorer le TAI.

En conclusion de cette discussion, un comité de rédaction comprenant MM. Bonanomi, Guinot, Markowitz et Terrien est chargé d'établir la recommandation de l'envoi au B.I.H. des données sur les horloges individuelles. Après discussion et amélioration en séance, cette recommandation a été adoptée à l'unanimité (*Recommandation S 1 (1972)*, p. S 22).

Passant à l'examen de l'*exactitude* de TAI, c'est-à-dire à la conformité de son intervalle unitaire à la seconde du SI, il est reconnu qu'il est trop tôt pour proposer un changement intentionnel de la durée de cet intervalle unitaire. On continuera donc à maintenir cette durée aussi constante que possible, au moins jusqu'à la mise en service des nouveaux étalons à césium de laboratoire qui sont en cours de construction.

Mr *Becker* explique pourquoi la définition de l'origine de TAI n'est pas satisfaisante. Il est dit, en effet, dans les règles de « Mise en pratique » de 1970, que TAI s'accorde approximativement avec le TU2 à 0 heure le 1^{er} janvier 1958; or TAI n'a été défini qu'en 1971. Sans changer physiquement l'origine de TAI, il faudrait trouver une définition plus correcte, telle que l'une de celles qu'il propose (Annexe S 7). Mr *Bonanomi* appuie la proposition B de cette Annexe. Conformément à cette proposition, la définition correcte exige l'attribution d'une date à l'origine de TAI selon un calendrier adopté pour TAI.

Estimant que le problème du calendrier n'est pas encore suffisamment résolu, le C.C.D.S. décide de maintenir, dans la « Mise en pratique » de 1970, le texte concernant l'origine de TAI.

3. Calendrier lié au TAI

Mr *Becker* rappelle les propositions de la P.T.B. (Annexes S 3 et S 7) concernant le problème, non inscrit à l'ordre du jour, d'un calendrier pour TAI. Il souligne qu'une échelle de temps n'a pas d'existence si l'on ne fournit pas le moyen d'exprimer la date d'un événement dans cette échelle. La situation présente n'est certes pas satisfaisante. Certains utilisent un calendrier en ans, mois, jours, etc. pour TAI et pour TUC,

par analogie avec le Temps Universel, d'autres un décompte décimal des secondes, d'autres, plus ou moins implicitement, un décompte en jours juliens atomiques. Malgré l'insistance de Mr *Becker* pour que le C.C.D.S. donne immédiatement son avis sur ce problème, on préfère en repousser l'examen. En effet, comme le soulignent MM. *Markowitz*, *Kovalevsky* et *Guinol*, ce problème est aussi du ressort de l'Union Astronomique Internationale. En particulier, la Commission 4 de l'U.A.I. a créé un groupe de travail sur les échelles de temps et les constantes astronomiques où l'on discute, entre autres, de la possible adoption du TAI en dynamique planétaire : si cette adoption a lieu, elle implique l'adoption d'un calendrier. Suivant Mr *Kovalevsky*, l'adjonction à ce groupe de travail de quelques nouveaux membres représentant le C.C.D.S. permettrait d'harmoniser les travaux.

Le C.C.D.S. décide de rédiger une recommandation qui attire l'attention sur ces problèmes et qui appelle la collaboration des organismes intéressés, de l'U.A.I. notamment. Cette recommandation est, par la suite, adoptée à l'unanimité (*Recommandation S 2 (1972)*, p. S 22).

A la question de Mr *Becker*, le *Président* confirme expressément que cette recommandation implique l'usage des méthodes ci-dessus mentionnées pour exprimer les dates, jusqu'à un règlement définitif.

S'il apparaît nécessaire de désigner des représentants du C.C.D.S. dans des groupes de travail, le *Président* du C.C.D.S., en liaison avec les intéressés, en suggérera les noms.

4. Aspect légal du TUC

Depuis l'adoption du Temps Universel Coordonné (TUC), on ne sait plus quelle doit être la base des temps légaux : est-ce TUC, ou le temps universel ? Pour Mr *Becker*, s'exprimant au nom de la République Fédérale d'Allemagne, ce problème est devenu particulièrement aigu depuis le 1^{er} janvier 1972, puisque l'écart entre le TUC (nouvellement défini à cette date) et le temps universel peut atteindre 0,7 s. La suggestion de Mr *Becker* est que la 15^e Conférence Générale des Poids et Mesures en 1975 désigne TUC comme base des temps légaux et il désire que le C.C.D.S. exprime immédiatement son avis dans ce sens.

Le *Président* désire savoir si d'autres pays éprouvent des difficultés avec la base de leurs temps légaux : il ne s'en trouve aucun à la connaissance des membres du C.C.D.S. ; en pratique tous les pays se réfèrent à TUC, puisque seule cette échelle de temps est diffusée directement par les signaux horaires. Néanmoins, MM. *Bonanomi*, *Costain*, *Orte*, s'exprimant respectivement au nom de la Suisse, du Canada et de l'Espagne, préféreraient qu'une recommandation d'utiliser TUC soit adoptée.

Mr *Winkler*, bien qu'il soit d'accord sur le principe d'une telle recom-

mandation, trouve cependant qu'elle serait prématurée car de larges groupes d'utilisateurs ne sont pas encore assez informés.

Le *Président* rappelle que la prochaine Conférence Générale des Poids et Mesures n'aura lieu qu'en 1975; étant donné les réserves faites, on peut donc s'accorder encore deux ans pour réfléchir et préparer une recommandation sur la base des temps légaux, en tenant compte des avis exprimés par les divers utilisateurs et par l'U.A.I.

Pour le moment, le C.C.D.S. peut signaler que l'adoption du TUC comme base des temps légaux est un grand progrès et noter sa satisfaction de voir qu'il est déjà d'un usage très général. Cela fera l'objet d'une déclaration dont la rédaction sera arrêtée par correspondance et qui sera communiquée aux organisations intéressées.

5. Questions diverses

Rôles respectifs des divers organismes s'occupant du temps. — Ce problème, qui avait été porté à l'ordre du jour, s'est trouvé traité au cours des discussions précédentes. Il n'a pas fait l'objet d'un examen particulier. Mr *Stettler* annonce que le Groupe 7 du Comité Consultatif International des Radiocommunications se réunira en janvier 1974 et que l'Assemblée Plénière du C.C.I.R. aura lieu en juillet 1974.

En réponse à une question de Mr *Winkler*, Mr *Smith*, président du Comité de direction du B.I.H., rappelle que toutes les décisions concernant l'activité scientifique du B.I.H. doivent être prises par ce Comité et c'est donc par lui que doivent passer les recommandations. Il fait remarquer qu'aucune difficulté ne s'est jamais présentée car les membres de ce Comité de direction assistent presque tous aux réunions où il est question du temps.

Étalons de fréquence optiques. — Mr *Barnes* rappelle que la multiplication des hyperfréquences jusqu'au domaine optique apporte une connexion entre les mesures de temps, de longueur et de la vitesse de la lumière, et que ces matières devraient être examinées ultérieurement par un Comité Consultatif approprié.

Désignation du Temps Atomique International. — Notant les inconvénients de la traduction des sigles (Annexes S 3 et S 7), le C.C.D.S. souhaite que le Temps Atomique International soit désigné par TAI dans toutes les langues. Ce souhait sera communiqué au Comité Consultatif des Unités.

* * *

Le *Président* remercie les membres du Comité Consultatif pour leur participation, et plus particulièrement MM. Becker et Winkler pour leur grande activité et Mr Guinot pour les travaux accomplis par le B.I.H.

(13 octobre 1972)

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

Envoi au Bureau International de l'Heure d'informations concernant les horloges individuelles

RECOMMANDATION S 1 (1972)

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

CONSIDÉRANT que le Bureau International de l'Heure (B.I.H.) pourrait améliorer l'uniformité du Temps Atomique International (TAI) s'il recevait des informations plus complètes,

RECOMMANDE que les organismes s'occupant de l'établissement des échelles de temps fournissent au B.I.H., sur sa demande et dans la forme qu'il aura spécifiée, les résultats des comparaisons des horloges atomiques individuelles ainsi que tous les renseignements pertinents.

Conséquences de l'adoption du Temps Atomique International pour les échelles de temps utilisées pour la vie courante

RECOMMANDATION S 2 (1972)

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

CONSIDÉRANT

1° que l'échelle de Temps Atomique International (TAI) implique un décompte des secondes à partir de son origine (en janvier 1958),

2° que les échelles de temps en usage pour la vie courante, qui sont basées sur la seconde du SI, continueront à faire intervenir les années, mois, jours, heures et minutes,

PROPOSE que ces questions soient étudiées en collaboration avec les organisations intéressées, en particulier l'Union Astronomique Internationale.

DÉCLARATION

Sur l'usage légal du Temps Universel Coordonné

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

CONSIDÉRANT les recommandations du Comité Consultatif International des Radiocommunications et de l'Union Astronomique Internationale pour

(*) Ces deux Recommandations et la Déclaration ont été approuvées par le Comité International des Poids et Mesures à sa 61^e session (octobre 1972).

un système amélioré du Temps Universel Coordonné (TUC) servant à la diffusion des signaux horaires,

PREND NOTE que l'acceptation quasi universelle du TUC peut fournir une base solide à une recommandation future de la Conférence Générale des Poids et Mesures sur un système horaire acceptable internationalement.

Appendice

Plan de travail du Bureau International de l'Heure pour l'amélioration du Temps Atomique International

1. Détermination courante du TAI

Pendant la durée des études mentionnées ci-après, TAI continuera à être établi par la méthode en vigueur à présent. Dans l'éventualité où d'autres échelles de temps locales deviendraient utilisables, elles seraient incorporées avec le poids unité.

2. Préparation à l'emploi des données d'horloges individuelles

Ces opérations pourront se dérouler comme suit :

a) vers octobre 1972 : Enquête sur les conditions d'utilisation des horloges dans les services horaires (le B.I.H. se réserve la possibilité de n'utiliser que les horloges exploitées dans des conditions satisfaisantes). Demande par le B.I.H. des comparaisons d'horloges pour toute l'année 1972 dans un format spécifié (cartes perforées et bandes perforées pourront être utilisées).

b) fin 1972-début 1973 : Réduction des données des horloges avec la méthode dite « ALGOS » qui comporte une pondération des horloges d'après leur marche moyenne bi-mensuelle.

c) début 1973 : Étude comparative des résultats courants et des résultats d'ALGOS. Bilan sur les temps d'exploitation d'ALGOS.

d) avril-mai 1973 : Présentation des résultats de l'étude au Président du C.C.D.S., au Président du Comité de direction du B.I.H., ainsi qu'aux laboratoires concernés. Si la nouvelle méthode paraît améliorer TAI, ce qui est très probable d'après l'étude qui a déjà été faite, son adoption sera proposée avec application immédiate. Il semble ainsi possible que la nouvelle méthode soit adoptée dans un an environ.

Notes

— Le calendrier proposé est approximatif.

— Dans ce qui précède, on ne modifiera pas intentionnellement la durée de l'intervalle unitaire de TAI. On fera en sorte que cette durée ne soit pas modifiée lors du passage d'une méthode à l'autre.

— On proposera ultérieurement une méthode destinée à assurer simultanément la stabilité à moyen terme (quelques années) et l'exactitude.

— Dans la nouvelle méthode, les résultats seront présentés sous la même forme qu'à présent. C'est-à-dire qu'on donnera, de 10 jours en 10 jours, les valeurs de TAI — TA(i) et TUC — TUC(i). Mais ces résultats ne paraîtront que tous les deux mois. De plus, on fournira aux laboratoires concernés les fréquences moyennes (relatives à TAI) et les poids de chacune des horloges.

ANNEXE S 1

Documents de travail présentés à la 6^e session du C.C.D.S.

Document

CCDS/

- 72-3 P.T.B. (Allemagne).- The UTC Time System and the problem of official time scales, by G. Becker (voir Annexe S 2).
- 72-4 P.T.B. (Allemagne).- Proposals of the P.T.B. with respect to the Agenda of the C.C.D.S. meeting 1972 (voir Annexe S 3).
- 72-5 B.I.H.- Saut de temps de TUC le 1^{er} juillet 1972.
UTC time step on the 1st of July 1972.
Ce document est la reproduction de l'annonce de saut de 1 seconde diffusée par le B.I.H.
- 72-7 N.R.C. (Canada).- Comments concerning the Agenda of C.C.D.S. 1972 (voir Annexe S 4).
- 72-8 I.E.N. (Italie).- I.E.N. activity on atomic frequency standards (voir Annexe S 5).
- 72-9 I.E.N. (Italie).- Time Scale Filtering (voir Annexe S 6).

Document

CCDS/

- 72-10 P.T.B. (Allemagne).- Proposals and reports of the P.T.B. for the C.C.D.S. meeting July 1972, by G. Becker (voir Annexe S 7).
- 72-11 P.T.B. (Allemagne).- Frequency comparisons with the P.T.B. standard CS 1, by G. Becker (voir Annexe S 8).
- 72-12 B.I.H.- Conclusions des études tendant à assurer la stabilité et l'exactitude du Temps Atomique International (voir Annexe S 9).
- Ce document constitue une synthèse des documents suivants :
- a) Atomic Time Scales, by B. Guinot and M. Granveaud, présenté à la "Conference on Precision Electromagnetic Measurements", Boulder, juin 1972 ;
- b) The International Atomic Time, by B. Guinot and M. Granveaud, présenté au "International Symposium on Algorithms used in Calculation of Atomic Time Scales", Boulder, juin 1972.
- 72-13 Instituto y Observatorio de Marina, San Fernando (Espagne).- Description of the time equipment of the I.O.M., by A. Orte (voir Annexe S 10).
- 72-14 Instituto y Observatorio de Marina, San Fernando (Espagne).- Remarks on the UTC as the basis for legal time, by A. Orte (voir Annexe S 11).
- 72-15 N.P.L. (Royaume-Uni).- Comments submitted to the 6th Session of the C.C.D.S. (voir Annexe S 12).
- 72-16 R.R.L.-N.R.L.M. (Japon).- Report for the 6th C.C.D.S. Meeting (voir Annexe S 13).
- 72-17 R.G.O. (Royaume-Uni).- The Greenwich Atomic time Scale, by C.J.A. Penny (voir le résumé à l'Annexe S 14).

Document

CCDS/

- 72-18 Around-the-World Atomic Clocks : Predicted Relativistic Time Gain, by J.C. Hafele and R.E. Keating.
 Around-the-World Atomic Clocks : Observed Relativistic Time Gains, by J.C. Hafele and R.E. Keating.
Ces deux documents sont publiés dans *Science* (USA), 177, No. 4044, 1972, pp. 166-170.
- 72-19 U.S.N.O. (Etats-Unis d'Amérique).- Preliminary comments for the C.C.D.S. Meeting 1972, by G.M.R. Winkler (voir Annexe S 15).
- sans N° U.S.N.O. (Etats-Unis d'Amérique).- Note concerning the use of "GMT", by G.M.R. Winkler (voir Annexe S 16).
-

ANNEXE S 2

Le système de Temps Universel Coordonné (TUC) et le problème des échelles officielles de temps

Par G. BECKER

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Allemagne)

(Traduction du Document CCDS/72-3)

Le nouveau système TUC recommandé par le C.C.I.R. [1] est fondé sur la "Question 1/7" [2] et sur son "Programme d'étude 1C-1/7" [3] qui déclare "qu'il est souhaitable qu'une même émission donne à la fois le temps universel (TU) et le temps atomique (TA)" et demande que des études soient poursuivies pour mettre au point des méthodes améliorées donnant TU et TA dans la même émission.

Il semble que le nouveau TUC soit effectivement l'une de ces méthodes améliorées donnant TA et TU aux utilisateurs.

Une étude très soignée du Groupe de travail provisoire 7/1 (IWP 7/1) du C.C.I.R. a conclu que le TUC est suffisant pour le travail des différents types d'utilisateurs.

D'après les documents existants du C.C.I.R. on peut dire :

1/ Il est clair que la recommandation du C.C.I.R. concernant le système TUC [1] est limitée aux "émissions de fréquences étalons et de signaux horaires" dans le sens du Groupe d'étude 7 du C.C.I.R. Cette recommandation ne concerne pas les autres émissions et les autres méthodes de diffusion du temps, telles que les annonces de l'heure à la radio ou à la télévision, les services horaires destinés à la navigation maritime ou aérienne, les horloges publiques, etc.

2/ Il n'existe aucune recommandation du C.C.I.R. (ni d'aucun autre organisme intergouvernemental) pour l'utilisation du TUC comme base officielle de temps dans les différents pays. Il n'existe pas davantage de recommandation du C.C.I.R. pour l'utilisation du TUC dans des buts scientifiques ou autres.

Répetons-le encore : le TUC est un moyen de fournir TA et TU dans une même émission. Le C.C.I.R. se sent responsable de transmettre aux utilisateurs TA et TU d'une façon fiable et avec des moyens techniques appropriés. Il n'importe pas au C.C.I.R. que les utilisateurs emploient TA, TU ou TUC pour leurs problèmes particuliers. La responsabilité du C.C.I.R. se termine avec l'émission du TUC par des stations déterminées.

On peut considérer que le TUC est un code horaire à partir duquel on peut, par décodage, déduire TA et TU (notamment TAI et TU1). Le dispositif de décodage peut en principe faire partie du récepteur de l'une des émissions du C.C.I.R. Par exemple, par lecture électronique de la correction DTU1 et son application automatique aux signaux TUC, le récepteur peut être simplement muni d'une sortie TU1. De même, en utilisant la différence connue TAI - TUC, une seconde sortie du récepteur peut donner TAI et une troisième sortie peut donner TUC. La tâche et la responsabilité du C.C.I.R. s'achèvent avec la transmission correcte de TU et de TA de l'émetteur au récepteur.

Le C.C.I.R. [4], l'U.R.S.I. [5] et la P.T.B. [6] ont demandé au C.I.P.M. et à la C.G.P.M. de définir une échelle de temps officielle à utiliser dans les pays membres de la Convention du Mètre. Apparemment, l'échelle de TAI n'est pas cette échelle de temps officielle puisqu'elle n'est pas distribuée et qu'elle est limitée aux applications scientifiques ; le TUC est certainement plus approprié à devenir la base de temps des fuseaux horaires (temps officiel, légal, civil). Le Groupe de travail provisoire 7/1 du C.C.I.R. a montré l'utilité du TUC.

Dans bien des pays, le temps légal (officiel, civil) est défini à partir du temps solaire moyen (TU + n.h). On a avancé que la différence entre le TUC et le TU est si petite qu'elle peut être négligée. Ce point de vue n'est pas acceptable. On doit décider dans un pays si le temps officiel (légal) est fondé sur le TUC ou sur le TU : dans un pays "l'heure

exacte" doit être clairement définie. Cela est particulièrement important quand il faut calculer des durées d'intervalles de temps (différences de dates) qui, dans les pays membres de la Convention du Mètre, doivent être exprimées en secondes du SI et non en secondes du TU. Une recommandation officielle des organes de la Convention du Mètre, exprimant que le TUC doit être la base du temps légal (officiel, civil), est la condition nécessaire pour l'unification mondiale de la métrologie du temps.

On a également dit que la recommandation dont il est question ci-dessus est superflue, car TUC serait dans la pratique la seule échelle de temps disponible.

Cet argument ne tient pas. Comme on l'a souligné, il est très facile aux responsables du temps officiel (légal) dans un pays d'appliquer la correction DTU1 et de diffuser dans le pays le temps solaire moyen. Cette façon de procéder a été sérieusement discutée en Allemagne Fédérale. L'acceptation finale du nouveau TUC pour les usages civils résulte d'une décision prise en 1971 par l'International Maritime Consultative Organization (I.M.C.O.) d'utiliser TUC pour la navigation maritime.

Le TUC ayant été accepté par l'Union Astronomique Internationale (Brighton 1970) et par l'I.M.C.O. (Londres 1971), l'organisation intergouvernementale responsable des problèmes météorologiques, le C.I.P.M. et la C.G.P.M., devrait recommander le TUC comme base des échelles de temps officielles dans les pays membres de la Convention du Mètre pour que les intervalles de temps soient mesurés dans le monde entier par référence au même système de temps afin que les résultats de mesure soient exprimés en secondes du SI.

(1^{er} mars 1972)

BIBLIOGRAPHIE

1. *C.C.I.R.*, XIIth Plenary Assembly, New Delhi, 1970, Vol. III, Study Group 7, Recommendation 460, p. 227 and C.C.I.R. Document Report 517 of St. Gr. 7, Geneva, 1971.
2. *Id.*, Vol. III, Study Group 7, Question 1/7, p. 259.
3. *Id.*, Vol. III, Study Programme 1C-1/7, p. 260.

4. *Id.*, Vol. III, Opinion 37, p. 271.
 5. *U.R.S.I.*, XVith General Assembly, Ottawa, 1969, Recommendation I.4.
 6. BECKER (G.), Proposition d'une activité dans le domaine des échelles de temps pour la Conférence Générale et le Comité International des Poids et Mesures, *Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 37, 1969, pp. 118-121.
-

ANNEXE S 3

Propositions de la P.T.B. (Allemagne) concernant l'ordre du jour de la 6^e session du C.C.D.S.

(Traduction du Document CCDS/72-4)

1. Mise en pratique du Temps Atomique International

- Reconsidération de la définition de l'origine du TAI.
- Décision sur l'origine réelle du TAI (1958 ou 1972 ?).
(Le passage du TA(BIH) au TAI doit être réglé).
- Décision sur le décompte des secondes de TAI (Jusqu'à maintenant TAI n'a pas les caractéristiques d'un calendrier).
- Discussion sur la différence entre "Temps" et "Echelle de temps" (voir par exemple G. Becker, Was ist eine Zeitskala ? *P.T.B.-Mitt.*, 81, 1971, p. 405-411).
- Par analogie avec l'abréviation internationale "SI", peut-on trouver pour le Temps Atomique International une abréviation qui soit acceptée internationalement ?
- Discussion des résultats pratiques sur le comportement des horloges atomiques.
- Discussion sur les méthodes d'établissement d'une moyenne des échelles de temps.
- Marche à suivre par le B.I.H. pour consulter les laboratoires qui contribuent à l'établissement du TAI et coopération avec le C.C.D.S.

2. Rôle des organes de la Convention du Mètre concernant le temps légal (officiel, civil)

- L'U.R.S.I., le C.C.I.R. et la P.T.B. (*Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 37, 1969, p. 118) ont demandé au C.I.P.M. (et à la C.G.P.M.) de définir une échelle de temps pour l'usage officiel, une question que le C.C.D.S. n'a pas considérée.
- Relation entre l'échelle de temps TUC du C.C.I.R., le TAI et les échelles de temps légales.
- Le C.C.D.S. devrait recommander que le TUC devienne la base des échelles de temps légal (officiel, civil).

3. Discussion de l'état actuel des recherches sur les étalons de temps et de fréquence

(Février 1972)

ANNEXE S 4

Commentaires du N.R.C. (Canada) pour la 6^e session du C.C.D.S.

(Traduction du Document CCDS/72-7)

1. PROGRÈS DES ÉTALONS ATOMIQUES DE FRÉQUENCE

L'attention continue d'être dirigée en premier lieu sur le maser à hydrogène et sur les étalons de fréquence à jet de césium.

A. Maser à hydrogène

Le travail sur les deux masers à hydrogène du N.R.C. a porté sur leur mise au point, tant à l'égard de leur exactitude que de leur stabilité. En ce qui concerne l'exactitude, une série de déterminations de l'effet de paroi [1] portant sur cinq ballons de stockage en quartz revêtus de téflon (diamètres s'échelonnant de 10 à 16 cm) a donné comme fréquence de la transition hyperfine de l'hydrogène la valeur $1\ 420\ 405\ 751,770 \pm 0,003$ Hz, mesurée par rapport à l'étalon de fréquence à jet de césium Cs III (2,1 m) du N.R.C. Des techniques expérimentales soigneuses ont montré que l'emploi de plusieurs ballons de stockage constitue une méthode valable pour déterminer l'effet de paroi avec une exactitude d'environ $\pm 0,001$ Hz, soit 7×10^{-13} .

Etant donné les possibilités de la stabilité de fréquence du maser à hydrogène et l'importance d'une telle stabilité pour la détermination expérimentale des erreurs systématiques

des étalons de fréquence à jet de césium, le travail a porté également sur l'amélioration de la stabilité à court terme. Dans les masers du N.R.C., la limitation provient souvent des modifications des dimensions de la cavité résonnante consécutives à des variations de température. Ces modifications résultent d'une constante de temps trop grande de la compensation thermique des cavités en silice fondue. On pense que l'emploi de cavités en aluminium convenablement isolées, tant pour la conduction que pour le rayonnement, entraînera une amélioration de la stabilité sur des périodes de plusieurs heures, durée nécessaire aux comparaisons de fréquence avec les étalons à césium.

B. Etalons de fréquence à jet de césium

Contrairement à ce qui est fait par d'autres services horaires nationaux, l'étalon à césium Cs III (2,1 m) du N.R.C. continue à être utilisé directement comme base des échelles TA et TUC du N.R.C. [2]. La nécessité de fréquents étalonnages, bi-hebdomadaires, des fréquences des trois horloges à césium Hewlett-Packard qui constituent les réalisations physiques approchées de ces échelles ont empêché d'effectuer un travail étendu de mise au point sur cet étalon. Toutefois, on a fait périodiquement des modifications mineures et des réévaluations des erreurs systématiques ; il en est résulté des changements de quelques 10^{-13} dans la fréquence des échelles de temps du N.R.C. Tous ces changements ont été mentionnés dans les bulletins mensuels du N.R.C. L'estimation de base de l'exactitude de cet étalon, environ 1×10^{-12} , n'a toutefois pas été changée.

On a fait, au moyen de l'ordinateur, des analyses théoriques des déplacements de fréquence dus à l'effet Doppler de second ordre [3] et aux différences de phase entre cavités [4]. Ces analyses ont montré l'importance d'une connaissance précise de la distribution de la vitesse des atomes dans les étalons à césium pour obtenir des exactitudes meilleures que 1×10^{-12} .

Un nouvel étalon de fréquence à césium, Cs V, est maintenant presque achevé et nous allons incessamment commencer à l'étudier. Cet étalon, d'une longueur d'interaction de 2,14 m, est comparable dans sa conception à Cs III, mais avec un certain nombre d'améliorations. Il permet ainsi le renversement de la direction du jet et le fonctionnement en mode axial ou

en mode décalé ; il possède un champ C d'uniformité améliorée et il peut fonctionner à une pression plus basse, ce qui a pour conséquence d'améliorer la stabilité normale du jet.

L'étalon Cs V a aussi été conçu pour fonctionner de façon continue comme horloge, afin de fournir directement une échelle physique de temps sans qu'il soit nécessaire d'établir d'autres horloges. Les observations faites sur Cs III indiquent que, mises à part des défaillances des circuits électroniques, ou du vide, Cs V devrait pouvoir fonctionner de façon continue, sans interruptions, sur des périodes de plusieurs années. Il devrait donc être possible, si l'on suppose que les erreurs systématiques demeurent constantes, de créer une échelle de temps possédant à la fois l'exactitude et la stabilité de l'étalon primaire. En pratique, un groupe de trois ou quatre horloges à césium ou à rubidium de fabrication commerciale fournira les échelles de temps auxiliaires pour relier les périodes pendant lesquelles Cs V ne fonctionnera pas, soit par suite de défaillance technique soit pour la réévaluation des erreurs.

2. RÉALISATION DE L'ÉCHELLE DE TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL (TAI)

A. Changement de fréquence

Au cours de 1971 et depuis le commencement de 1972, les différences TAI-TA(i) ont augmenté plus ou moins régulièrement pour la plupart des laboratoires contribuant au TAI. Le tableau ci-dessous, extrait des circulaires "D" du B.I.R., résume ces accroissements, avec les décalages de fréquence qui leur correspondent, pour la période du 3 janvier au 2 avril 1972.

Laboratoire (i)	Augmentation TAI-TA(i) (en μ s)	Décalage de fréquence (en 10^{-13})
PTB	1,3	- 1,7
USNO	- 0,7	0,9
F	- 1,4	1,8
NBS	9,7	- 12,5
RGO	3,2	- 4,1
NRC	1,0	- 1,3
ON	5,8	- 7,5

Moyenne - 3,5

Les décalages de fréquence indiqués dans le tableau ci-dessus, qui présentent un écart maximal de $14,3 \times 10^{-13}$, se répartissent de $-12,5$ à $+1,8 \times 10^{-13}$. Deux méthodes fondamentalement différentes ont été utilisées pour l'élaboration des différents TA(i). Dans l'une, dont l'exemple type est TA(NRC), l'échelle est fondée exclusivement sur un seul étalon primaire de fréquence à long jet ; dans l'autre, on utilise des groupes comprenant jusqu'à seize horloges de type commercial dont l'exactitude et la stabilité sont quelque peu inférieures. Des observations faites sur de telles horloges montrent que l'écart quadratique moyen de leur fréquence est de l'ordre de 20×10^{-13} . On peut estimer à 40 environ le nombre total de ces horloges contribuant simultanément à TAI. En conséquence, l'erreur probable de la moyenne ($2 \sigma_m$) est environ 6×10^{-13} , soit à peu près le double du décalage moyen de TAI. De plus, l'erreur probable de Cs III du N.R.C. est de l'ordre de 10×10^{-13} . En conséquence, le décalage mesuré de TAI de $3,5 \times 10^{-13}$ n'apparaît pas comme significatif, et aucune modification de fréquence ne semble justifiée.

B. Origine de TAI

L'origine du TAI, 0h 0m 0s, 1^{er} janvier 1958, est celle de A3, la première échelle de temps atomique internationale conservée par le B.I.H. et fondée sur des comparaisons internationales en ondes myriamétriques et au moyen du Loran-C. Le B.I.H. a été chargé par la 14^e Conférence Générale des Poids et Mesures de la responsabilité du TAI ; par conséquent, ce choix pour l'origine du TAI constitue la mise en oeuvre de la décision de la C.G.P.M. Ce choix est probablement le plus utile pour les laboratoires et les observatoires qui ont besoin de la plus longue période rattachée de façon plus ou moins continue à la seconde atomique. Du point de vue du N.R.C., aucun changement dans l'origine de TAI n'est nécessaire.

C. Pondération de TA(i)

La question de savoir quel poids doit être attribué à chaque TA(i) soulève le problème de la confiance que l'on peut avoir dans l'estimation de l'exactitude de la fréquence de chaque participant. Si toutes les horloges qui contribuent à TAI avaient une exactitude semblable, il suffirait d'attribuer

des poids proportionnels à la racine carrée du nombre d'horloges servant à former chaque TA(i) indépendant. A l'exception des échelles fondées sur des étalons primaires à césium, on pourrait suivre cette méthode de pondération. Toutefois, on a montré que les étalons individuels actuels à long jet de césium sont susceptibles d'exactitudes et de stabilités meilleures, jusqu'à un facteur 10, que celles de la plupart des étalons commerciaux couramment utilisés qui comprennent actuellement les ensembles d'horloges indépendantes. Etant donné que, selon toute probabilité, les étalons de temps et de fréquence à long jet de la prochaine génération seront considérablement plus stables et plus exacts que leurs prédécesseurs, il faudrait envisager un système de pondération modifié. Ce système serait sans doute fondé sur des évaluations expérimentales et théoriques de l'exactitude de chaque étalon, et sur la façon dont il fournit l'échelle de temps, soit directement soit par l'intermédiaire de l'étalonnage d'un ensemble d'horloges. Dans ce dernier cas, la stabilité de l'ensemble aurait une importance majeure.

3. RELATIONS ENTRE LE C.C.D.S. (C.I.P.M.).

L'U.A.I., L'U.R.S.I., LE C.C.I.R.

Le système actuel semble fonctionner de façon satisfaisante avec des représentations qui se chevauchent et qui constituent le type le plus étroit possible de liaison entre le C.C.D.S., l'U.A.I., l'U.R.S.I. et le C.C.I.R. Le B.I.H. joue un rôle extrêmement important en conservant à la fois TA et TUC et on doit lui apporter toute l'aide morale et financière nécessaire pour poursuivre ce travail.

4. DEFINITION DU TEMPS LÉGAL ET SA RELATION AVEC LE TAI

Au Canada, le temps est légalement défini comme celui qui est déterminé par le N.R.C. et diffusé par les émissions de radio courantes ou sur ondes courtes. Depuis le 1^{er} janvier 1972, le temps est maintenu au Canada aussi étroitement que possible en accord avec le TUC (B.I.H.) et il ne semble y avoir aucune raison de modifier cette façon de faire. Il y aura donc des sauts de 1 seconde par rapport à TAI ; ainsi TUC (NRC) constitue la base du temps légal au Canada.

BIBLIOGRAPHIE

1. MORRIS (D.), Hydrogen maser wall-shift experiments at the National Research Council of Canada, *Metrologia*, 7, n° 4, 1971, p. 162.
 2. MUNGALL (A.G.), Atomic Time Scales, *Metrologia*, 7, n° 4, 1971, p. 146.
 3. MUNGALL (A.G.), The second order Doppler shift in cesium beam atomic frequency standards, *Metrologia*, 7, n° 2, 1971, p. 49.
 4. MUNGALL (A.G.), Cavity phase dependent frequency shifts in cesium beam frequency standards, *Metrologia*, 8, n° 1, 1972, p. 28.
-

ANNEXE S 5

Activité de l'I.E.N. (Italie) dans le domaine des étalons atomiques de fréquence

(Traduction du Document CCDS/72-8)

I. ÉTALONS SECONDAIRES À CÉSIIUM

En liaison avec l'Institut de Physique de l'Université de Pise, des travaux de recherches sont en cours sur la possibilité de réaliser des étalons de fréquence secondaires à césium dans lesquels la sélection des états serait effectuée par pompage optique.

Ce type de sélection, obtenu il y a quelques années par Bender et al. [1], a été récemment réalisé en utilisant un filtre magnétique fondé sur l'effet Paschen-Back [2, 3, 4].

C'est en 1970 qu'on a proposé pour la première fois [5] l'adoption de ce type de filtre pour les étalons de fréquence secondaires, actifs ou passifs. Cette technique ne peut être utilisée pour les étalons primaires, car un gaz tampon doit être employé dans la cellule à césium. On a construit un prototype passif en 1971. On a ainsi prouvé que l'on peut atteindre, à la température ambiante, une efficacité de transfert de 18 % entre les niveaux $F = 3$ et $F = 4$. Deux de ces étalons sont en cours de montage, principalement pour vérifier la stabilité à long terme. Les mesures préliminaires de la stabilité à court terme donnent des résultats qui ne le cèdent en rien à ceux que l'on obtient avec un étalon à vapeur de rubidium.

Il convient de mentionner que certains travaux sont en cours pour réaliser un maser à césium à pompage optique.

II. RECHERCHES SUR LES ÉTALONS PRIMAIRES

1. L'utilisation de la structure fine $3P_0 - 3P_1$ du magnésium ou du calcium comme base d'un étalon primaire de fréquence est en cours d'étude à l'Université de Pise. Les principales caractéristiques d'un tel étalon ont été exposées au cours du Séminaire "Frequency standards and metrology", qui s'est tenu à l'Université Laval, Québec, Canada, en août 1971 ; elles sont discutées dans [6].

L'exactitude est principalement limitée par l'effet Doppler de second ordre ; on prévoit une exactitude possible de l'ordre de 10^{-15} , c'est-à-dire à la limite d'un dispositif à jet atomique.

2. L'I.E.N. fait aussi des essais avec un étalon de fréquence à jet de césium qui utilise comme résonateur un tube commercial ayant une longueur d'interaction d'environ 25 cm.

Le système d'asservissement qui a été conçu à l'I.E.N. [7] utilise des techniques numériques pour éviter les effets de température que l'on rencontre quelquefois dans les asservissements analogiques.

BIBLIOGRAPHIE

1. BENDER (P.L.), BEATY (E.C.) and CHI (A.R.), Optical detection of narrow Rb 87 hyperfine absorption lines, *Phys. Rev. Letters*, 1, 1958, p. 311.
2. ERNST (K.), MINGUZZI (P.) and STRUMIA (F.), A Paschen-Back hyperfine filter for optical pumping, *Il Nuovo Cimento*, X, 51B, 1967, p. 202.
3. ERNST (K.) and STRUMIA (F.), High efficiency hyperfine pumping of cesium vapor, *The Physical Review*, 170, 1968, p. 48.
4. BEVERINI (N.) and STRUMIA (F.), High efficiency hyperfine filter for the caesium resonance lines, *Optics Communications*, 2, n° 4, 1970, p. 189.
5. STRUMIA (F.), Sulla possibilità di realizzare un maser operante sulla riga campione $F = 4,0$, $F = 3,0$, del cesio, *Bollettino Soc. It. di Fisica*, 79, 1970, p. 122.
6. STRUMIA (F.), A proposal for a new absolute frequency standard, using a Mg or Ca atomic beam, *Metrologia*, 8, n° 3, 1972, p. 85-90.
7. RONCALLI (G.), Asservimento di tipo numerico per un campione a fascio di cesio, *LXXII Riunione AEI*, memoria 2.03, Venezia, 1971.

ANNEXE S 6

Filtrage des échelles de temps

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris (Italie)

(Traduction du Document CCDS/72-9)

En général, on peut s'y prendre de deux façons pour établir une échelle de temps :

a) utiliser une moyenne arithmétique fondée sur un important groupe d'horloges ;

b) faire, sur un petit groupe d'horloges, une étude statistique appropriée des différences entre les indications et l'estimation de la position de chaque horloge.

Dans ce contexte, quelques travaux récents ont été effectués à l'I.E.N. ⁽¹⁾ pour obtenir une bonne uniformité avec un nombre minimal d'horloges indépendantes. En conséquence, il faut éviter des critères de rejet trop stricts et la méthode devrait permettre de qualifier à nouveau une horloge après une défaillance. En gardant présentes à l'esprit toutes ces exigences, on a introduit un modèle linéaire continuellement mis à jour pour estimer l'état futur de chaque horloge.

Les différences entre les estimations des différentes horloges et l'estimation d'une horloge donnée, choisie comme référence, sont comparées aux indications des différentes horloges par rapport à la même horloge de référence. Les résultats obtenus au moyen de ces comparaisons sont filtrés par la

(1) LESCHIUTTA (S.), The IEN time scale, as an application of some ideas on timekeeping, In "Proceedings of the frequency standards and metrology Seminar", Université Laval, Québec, 1971, pp. 411-430.

méthode de Kalman-Bucy, pour obtenir la "meilleure estimation" pour la position de chaque horloge.

Le programme de calcul par ordinateur décèle les discontinuités dans le fonctionnement et applique, si nécessaire, une correction à la position estimée de l'horloge avant le filtrage des données. Tout cela est soigneusement enregistré. En conséquence, aucune horloge n'est rejetée.

Pour chaque horloge et pour chaque mesure, on imprime les indications, l'état après filtrage, le modèle mis à jour et les écarts-types correspondant à ces deux dernières entités. Un ordinateur avec une mémoire de 8192 mots peut effectuer les calculs désirés.

Les résultats préliminaires de cette recherche indiquent que l'on atteint rapidement une nette amélioration de l'uniformité, mais il serait souhaitable de faire des contrôles plus nombreux. Le programme correspondant, écrit en langage Fortran IV, est à la disposition de toutes les personnes intéressées. On envisage de nouvelles mises au point pour étudier les différents effets du bruit et la convergence des filtrages par itération sur le même groupe de données.

(Mai 1972)

ANNEXE S 7

Propositions et rapports de la P.T.B. (Allemagne) pour la 6^e session du C.C.D.S.

Par G. BECKER

(Traduction du Document CCDS/72-10)

1. PROGRÈS DES ÉTALONS DE FRÉQUENCE

On estime à l'heure actuelle à 4×10^{-13} [1] l'incertitude relative intrinsèque ("exactitude") de l'étalon primaire de fréquence et de temps CS1 de la P.T.B. (prototype de laboratoire). Toutes les causes d'incertitude connues conduisent pour cet instrument à une incertitude totale de $2,1 \times 10^{-13}$. La quantité arbitraire $3,5 \times 10^{-13}$ a été ajoutée quadratiquement pour tenir compte d'incertitudes éventuelles inconnues. On considère la valeur 4×10^{-13} comme une estimation prudente.

2. MISE EN PRATIQUE DU TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL

2.1. Changement éventuel de l'unité de l'échelle de TAI

Il ne semble y avoir pour le moment aucune nécessité de modifier la durée de l'unité de l'échelle de TAI : cette unité, telle qu'elle est actuellement conservée, est probablement trop courte de 5 à 10×10^{-13} s ; cela résulte de données expérimentales provenant des comparaisons de l'unité de l'échelle de TAI avec la seconde du SI. A la P.T.B., on considère que la durée de l'unité de l'échelle de TAI augmente régulièrement à cause de la marche typique des horloges commerciales qui contribuent essentiellement au TAI.

2.2. Date de validité du TAI

Il faut fixer la date de l'origine du TAI. D'un point de vue strict, il semble impossible d'étendre trop loin dans le passé, par exemple jusqu'en 1958, la validité du TAI.

D'un point de vue pratique, les dates suivantes semblent convenables comme origines du TAI :

1^{er} janvier 1969 TAI
ou 1^{er} janvier 1972 TAI.

2.3. Origine du TAI

On indique ci-après quelques objections contre la définition de l'origine du TAI donnée par le C.C.D.S. (1970) :

a) Le C.C.D.S. indique que l'échelle de TAI est définie "conformément aux recommandations de l'Union Astronomique Internationale (XIII^e Assemblée Générale, Prague, 1967), ...". On aurait dû dire "conformément aux résolutions des Commissions 4 et 31 de l'U.A.I. à l'Assemblée Générale de Prague, 1967". Autant qu'on le sache à la P.T.B., il convient de faire la distinction entre les résolutions des commissions et celles de l'Assemblée Générale (*).

b) Si l'on est d'accord pour dire que le TAI n'existait pas en 1958, il semble inacceptable de prendre comme origine une date précise du TAI au cours de l'année 1958.

c) Il est impossible de définir l'origine du TAI sur la base d'une déclaration comme celle du C.C.D.S. (1970). Ce type de définition convient à la plupart des échelles de temps atomique existantes. Par exemple, l'origine de TA(PTB) est voisine aussi de 0^h, 1^{er} janvier 1958 TU2. Mais cette origine n'est pas la même que celle de TA(BIH) (précédemment A3).

Propositions de définitions de l'origine du TAI

A. On suppose d'abord que le TAI a commencé le 1^{er} janvier 1969 (ou 1972) :

"L'origine du TAI, désignée par la date 0^h, 1^{er} janvier 1969 (ou 1972) TAI, est l'instant qui a pour date 0^h, 1^{er} janvier 1969 (1972) TA(BIH). L'échelle de temps TA(BIH) prend fin à cet instant."

(*) *Note du B.I.P.M.* - On doit rappeler à ce sujet que l'Assemblée Générale de Prague (1967) a adopté la Résolution N° 9 dans laquelle "cette Assemblée Générale désire exprimer son approbation des résolutions adoptées par ses différentes Commissions, et recommande que les astronomes appliquent ces Résolutions dans toute la mesure du possible."

A titre d'information on peut ajouter :

"L'origine du TA(BIH) (précédemment A3) est un instant particulier choisi par le B.I.H., avec comme date 0^h, 1^{er} janvier 1958 A3 et qui est proche de 0^h, 1^{er} janvier 1958 TU2."

L'instant particulier choisi par le B.I.H. comme origine de A3 n'a pas été proposé ni défini par l'U.A.I., qui n'a pas non plus approuvé explicitement la décision du B.I.H. On peut toutefois interpréter les Résolutions 4 et 5 (1967) des Commissions 4 et 31 comme une approbation implicite de la façon de procéder du B.I.H. On peut donc ajouter encore :

"L'origine de A3 choisie par le B.I.H. est en accord avec les Résolutions 4 et 5 des Commissions 4 et 31 de l'U.A.I. (XIII^e Assemblée Générale, Prague, 1967)."

B. Si l'on choisissait de dire que le TAI existait déjà effectivement en 1958 :

"L'origine du TAI, précédemment TA(BIH), antérieurement A3, est un instant particulier choisi par le B.I.H., qui a pour date 0^h, 1^{er} janvier 1958 A3. Cet instant est proche de 0^h, 1^{er} janvier 1958, TU2."

On peut aussi ajouter une référence à l'accord avec les Résolutions de l'U.A.I. de 1967.

L'article [2] sur la définition des échelles de temps traite aussi le problème de la définition de l'origine des échelles de temps.

2.4. Décompte des unités de l'échelle de TAI

En 1970, le C.C.D.S. n'a pas décidé de la façon de décomposer les unités de l'échelle ni de la façon d'indiquer un instant particulier ("datation").

Proposition

"Partant de l'origine du TAI, on forme les multiples suivants de la seconde de TAI :

la minute (d'échelle) = 60 secondes de TAI - en abrégé
secondes (d'échelle) - selon la
définition du C.C.D.S. (1970)

l'heure (d'échelle) = 60 minutes (d'échelle)

le jour de calendrier = 24 heures (d'échelle)".

A. Calendrier grégorien

Proposition

"La formation des mois de calendrier et des années de calendrier comme groupes de multiples du jour de calendrier, y compris leurs appellations, devra être effectuée selon les règles du calendrier grégorien."

Une déclaration selon laquelle le calendrier grégorien sera valable pour le TAI inclurait la façon de fixer les dates de Pâques et de Pentecôte (Règle de Pâques) et les dénominations de jours particuliers du calendrier. Ce n'est pas ce qui est recherché et cela devrait être limité à un calendrier TUC.

Régler le problème du calendrier de TAI semble ne pas être superflu :

1. En 1968, au cours d'une discussion entre spécialistes des échelles de temps lors de la "Conference on Precision Electromagnetic Measurements" à Boulder, la majorité exprima le point de vue que des décisions internationales sont nécessaires pour former des jours de calendrier, des mois de calendrier et des années de calendrier à partir de la seconde SI.

2. On a fait des propositions pour un décompte décimal des unités de l'échelle de TAI. La P.T.B. n'appuie pas ces propositions.

B. Date atomique (internationale) julienne

Proposition

"La méthode de décompte décimal des jours juliens peut être utilisée pour la datation. Avec cette méthode une date pourrait être appelée :

"Date atomique internationale julienne, JIAD"⁽¹⁾

ou "Date atomique julienne, JAD"⁽¹⁾.

Si l'on choisissait la deuxième désignation, il n'y aurait aucune possibilité d'appliquer la méthode de décompte des jours juliens aux échelles atomiques de temps qui sont différentes du TAI, à moins que l'on spécifie la désignation de l'échelle de temps.

Par exemple :

La date 0^h, 1^{er} janvier 1969 TAI ou TA(PTB) peut correspondre à la date

$$\text{JIAD} = 2\ 440\ 222,5$$

ou à

$$\text{JAD} = 2\ 440\ 222,5 \text{ TAI ou TA(PTB)}.$$

La P.T.B. accepterait indifféremment JIAD ou JAD ... TAI.

"La date d'un événement comprend la J(I)AD du commencement d'un jour de calendrier de TAI plus le TAI de l'heure du jour ou la fraction décimale du jour de calendrier de TAI à l'instant de l'événement à dater."

(1) On a conservé le sigle de l'expression anglaise donnée dans le document original.

"L'origine du TAI correspond à
 $J(I)AD = 2\ 440\ 222,5$, 0^h (TAI)
ou $J(I)AD = 2\ 440\ 222,5\bar{0}$ (TAI)".

En ce qui concerne ce nombre, on suppose que l'origine du TAI a été choisie comme étant 0^h , 1^{er} janvier 1969 TAI dans le calendrier grégorien.

"On peut également utiliser la méthode du décompte modifié des jours juliens (C.C.I.R., Recommandation 457, New Delhi 1970). Une date obtenue selon cette méthode sera appelée :

"Date atomique (internationale) julienne modifiée, MJ(I)AD"⁽¹⁾.

On a par définition :

$$MJ(I)AD = J(I)AD - 2\ 400\ 000,5$$

L'origine du TAI correspond à

$$MJ(I)AD = 40\ 222, 0^h \text{ (TAI)}$$

ou

$$MJ(I)AD = 40\ 222,0\bar{0} \text{ (TAI)".}$$

2.5. Désignation du TAI

La P.T.B. présente deux propositions :

A. On propose d'appeler l'échelle de temps en question :

"Echelle de Temps Atomique International" TAI
au lieu de "Temps Atomique International".

Le mot "temps" est employé pour les intervalles de temps, les concepts de temps et les échelles de temps. Il est souhaitable d'exprimer clairement qu'il s'agit d'une échelle de temps. L'article [2] traite de ces questions en détail.

B. On propose de trouver pour l'échelle de temps en question une abréviation acceptée internationalement. Il n'existe pas jusqu'à maintenant d'abréviations de ce genre pour les échelles de temps, et cette situation est regrettable. Dans le cas de l'échelle de Temps Atomique International, il se présente actuellement une occasion favorable pour se mettre d'accord sur une abréviation unique à utiliser dans toutes les langues. Il est souhaitable également que l'on parvienne à un accord pour les abréviations concernant le décompte (modifié) des jours juliens.

2.6. Pondération des échelles de temps participant à l'établissement du TAI

La façon dont le B.I.H. calcule actuellement la moyenne des échelles de temps semble ne pas être la meilleure. On propose une méthode améliorée :

En se servant de facteurs de pondération (poids) estimés

le B.I.H. calcule d'abord la marche provisoire R''_N de chaque échelle de temps par rapport au TAI, en tenant compte des différences d'heure avec le TAI actuel encore provisoire et avec le TAI N jours auparavant. On compare R''_N à la marche R_M de l'échelle par rapport au TAI, évaluée à partir des différences d'heure avec le TAI N + M jours et N jours auparavant. La variation de marche

$$\Delta R' = (R''_N - R_M)$$

est considérée comme un paramètre de classification utilisé pour fixer le poids.

S'il y a n échelles de temps qui contribuent à l'établissement du TAI, n/4 d'entre elles ayant les paramètres de classification les plus élevés se verront attribuer le poids $P = 1$. Les n/4 échelles de temps ayant les plus faibles paramètres de classification se verront attribuer le poids $P = 3$ et les autres $P = 2$.

Avec ces poids, on calcule les marches corrigées R'_N et les paramètres de classification corrigés ΔR des différentes échelles de temps ; il en résulte une nouvelle répartition des n échelles de temps dans les trois groupes auxquels on attribue respectivement les poids $P = 1$, $P = 2$ et $P = 3$. On calcule alors TAI de façon définitive en tenant compte de ces poids. Ceux-ci servent également comme poids estimés pour le calcul suivant de TAI.

On suppose que

$$50 \leq N \leq 100$$

et

$$50 \leq M \leq 200$$

fournissent des intervalles de temps convenables.

La proposition de la P.T.B. remplit les conditions suivantes :

1. Il devrait y avoir une limite supérieure pour le poids à attribuer, afin d'éviter qu'une ou plusieurs échelles n'aient une influence prépondérante.

2. Il devrait être possible de réduire jusqu'à un certain degré l'influence d'une échelle apparemment moins fiable que la moyenne.

3. L'incertitude due à la transmission de l'échelle au B.I.H. ne devrait pas affecter de façon significative la détermination de la marche de l'échelle.

La P.T.B. serait également d'accord pour un mode de classification différent fondé sur ΔR , si ce mode assure une limite supérieure et une limite inférieure raisonnables pour

l'influence d'une échelle. On peut fixer par exemple le rapport de ces limites à 1:3 et l'influence maximale à 1,5/n. On pense qu'il n'est pas souhaitable d'adopter des poids fondés sur l'importance de l'installation utilisée pour obtenir l'échelle de temps.

Afin de prouver l'indépendance de leur échelle de temps les services horaires qui contribuent à l'établissement du TAI doivent être priés de publier les différences TA(i)-LORAN aussi rapidement que possible et d'une manière bien déterminée (par exemple chaque semaine).

3. RELATIONS MUTUELLES ET RÔLES DES ORGANISATIONS S'OCCUPANT DES ÉCHELLES DE TEMPS

Le point de vue de la P.T.B. sur cette question est présenté dans le Document CCDS/72-3 (voir Annexe S 2).

4. RÉPERCUSSION DES ÉCHELLES DE TEMPS INTERNATIONALES SUR LA DÉFINITION DES ÉCHELLES DE TEMPS LÉGAL

Sur la base de ce qui est exposé dans l'Annexe S 2, la P.T.B. propose d'adopter ce qui suit :

Recommandation

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

Considérant

1. la nécessité d'un système mondial de temps coordonné sur la base de la seconde du SI,
2. que le C.I.P.M. et la C.G.P.M. ont été priés par les organisations internationales compétentes (U.R.S.I., C.C.I.R.) de définir une échelle de temps officielle qui devrait être utilisée dans les pays membres de la Convention du Mètre,
3. que la diffusion de l'échelle de Temps Atomique International ne semble pas convenir actuellement pour éviter la confusion avec le Temps Universel dont la navigation a besoin,
4. que le C.C.I.R. a établi, pour les "Emissions de fréquences étalons et de signaux horaires" des services particuliers, l'échelle de "Temps Universel Coordonné" TUC qui est en relation étroite avec l'échelle de Temps Atomique International,
5. que le TUC a été approuvé par l'U.A.I. (Brighton, 1970) pour application dans ses domaines d'intérêt et par le Comité Consultatif Maritime International (IMCO) (Londres, 1971) pour la navigation,

6. que l'utilisation générale des échelles de temps des fuseaux horaires fondées sur le TUC rendrait le TAI accessible pour la mesure du temps et des intervalles de temps,

recommande

- 1° que l'échelle de temps valable dans un pays membre de la Convention du Mètre concorde aussi étroitement que possible avec l'échelle de temps du fuseau horaire correspondant, cette échelle étant fondée sur l'échelle de Temps Universel Coordonné (TUC) telle qu'elle est obtenue par le Bureau International de l'Heure à partir de l'échelle de Temps Atomique International,
- 2° qu'une échelle de temps de fuseau horaire fondée sur le TUC et différant du TUC d'un nombre entier d'heures soit appelée "échelle de temps coordonné du fuseau horaire", par exemple "(échelle de) Temps Coordonné de l'Europe Centrale".

BIBLIOGRAPHIE

1. BECKER (G.), KRAMER (G.), MÜLLER (E.K.), Eigenschaften des primären Zeit- und Frequenznormals CS1 der PTB ; Messergebnisse. *P.T.B. Jahresbericht* 1971, pp. 103-104, § 1.13, Braunschweig, 1972.
2. BECKER (G.), Was ist eine Zeitskala ? *PTB-Mitt.*, 81, 1971, pp. 405-411.

ANNEXE S 8

Comparaisons de fréquences avec l'étalon CS1 de la P.T.B.

Par G. BECKER

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Allemagne)

(Traduction du Document CCDS/72-11)

On pense que la méthode de calcul de la moyenne proposée par la P.T.B. (voir Annexe S 7) pour l'établissement du TAI peut permettre d'améliorer la stabilité de l'unité de l'échelle de TAI sur des durées de quelques centaines de jours environ ; cette méthode ne peut toutefois pas plus que celle qui est employée actuellement par le B.I.H., assurer la stabilité à long terme de cette unité. Comme on l'a déjà souligné⁽¹⁾, une dérive à long terme des unités d'échelle des échelles de temps qui sont essentiellement fondées sur des étalons commerciaux est très probable et ne peut être évitée que par l'utilisation d'étalons primaires de temps et de fréquence.

La figure 1 donne les résultats de mesure des fréquences qui correspondent au TAI ainsi qu'aux échelles de temps qui contribuent à son établissement, par rapport à la fréquence étalon de l'étalon primaire CS1 de la P.T.B. On estime que la reproductibilité à long terme de CS1 est environ 1×10^{-13} , lorsqu'on reproduit soigneusement des conditions de fonctionnement identiques, y compris la suppression d'une éventuelle différence de phase entre les deux cavités.

(1) BECKER (G.), Zum Problem künftiger Zeitskalen, *PTB-Mitt.*, 79, 1969, pp. 441-446 et Document CCDS/70-11, annexe 1.

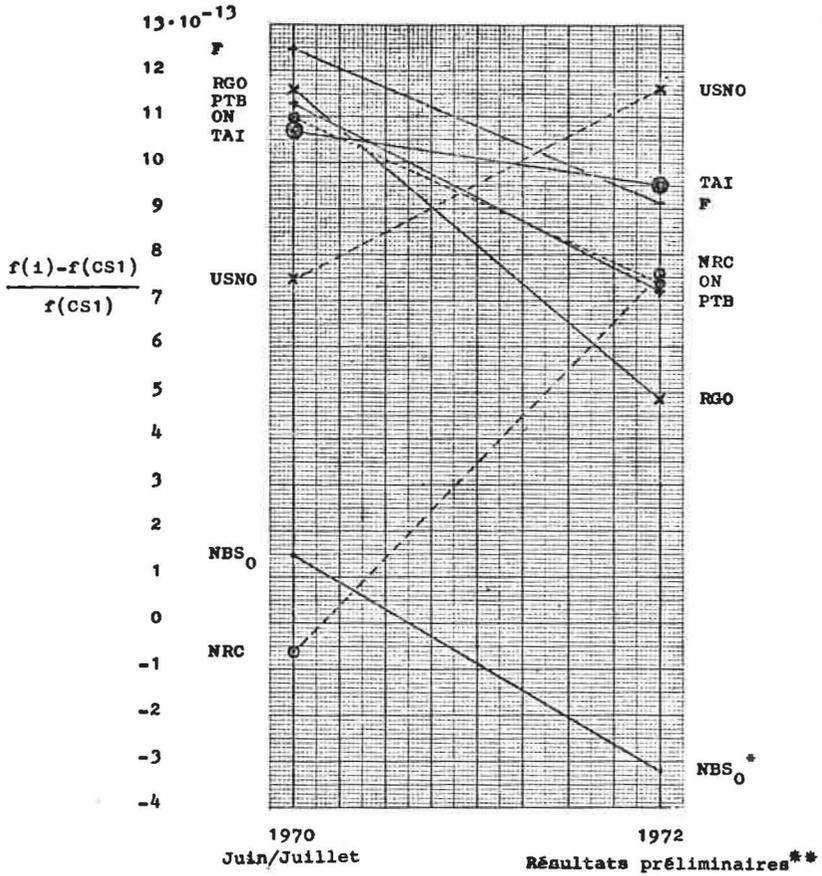


Fig. 1.- Mesures de fréquences par comparaison à l'étalon CS1 de la P.T.B.

** { Juin : Comparaison de TA(PTB) avec CS1.
 { 3 mars au 2 mai : Comparaisons de TA(PTB) avec TAI et les autres échelles.

* "NBS₀" signifie : Après application de la correction relativiste.
 f(i) est la fréquence correspondant à l'échelle de temps du laboratoire "i".

Apparemment, la petitesse du changement de la fréquence du TAI pendant deux ans est due à l'accroissement des fréquences de l'U.S.N.O. et du N.R.C. Si l'on continue à obtenir le TAI selon la méthode actuelle, il en résultera probablement une nouvelle diminution de la fréquence du TAI. Un autre résultat de ces comparaisons est que la stabilité à long terme de l'échelle de l'U.S.N.O. n'est pas tellement supérieure à celle de certaines autres échelles qu'elle justifie le poids double qui lui a été jusqu'ici attribué.

Il faut demander aux laboratoires de publier aussi fréquemment que possible leurs déterminations de l'unité d'échelle de TAI au moyen de leurs étalons primaires, et de faire clairement la distinction entre l'incertitude intrinsèque ("exactitude") de leurs étalons et leur reproductibilité par rapport aux résultats publiés antérieurement.

(14 juin 1972)

**Conclusions des études
tendant à assurer la stabilité et l'exactitude
du Temps Atomique International**

Par B. GUINOT

Bureau International de l'Heure

(Document CCDS/72-12)

1. Une pondération variable des temps atomiques locaux $TA(i)$, dont le Temps Atomique International (TAI) est la moyenne, en fonction des propriétés statistiques passées ne paraît pas justifiée. Il est préférable, au moins tant que de nouveaux types d'étalons de temps ne seront pas mis en service, de conserver un système de pondération prédéterminé en fonction de l'équipement disponible.

2. Les $TA(i)$, même lorsqu'ils sont établis pour assurer au mieux l'uniformité, présentent des dérives de fréquence qui peuvent atteindre plusieurs 10^{-13} en un an. En conséquence, on peut craindre des dérives de fréquence de TAI de l'ordre de 1×10^{-13} par an.

3. Dans le but d'augmenter la stabilité à long terme de TAI, nous faisons les propositions suivantes :

3.1. On augmentera le nombre d'étalons participants. En un premier temps, on regroupera les données d'étalons isolés (jusqu'à maintenant inutilisées) pour former une échelle auxiliaire stable qui jouera le même rôle qu'un $TA(i)$.

3.2. Toujours en un premier temps, on n'utilisera pas directement les $TA(i)$ qui ne répondent pas au critère de stabilité. On pourra remplacer ces $TA(i)$ par des échelles auxiliai-

res, construites à partir des données des étalons.

3.3. Ultérieurement, on calculera TAI directement à partir des données de tous les étalons individuels. On pourra alors appliquer avec profit des règles de pondération à ces étalons afin d'assurer la meilleure stabilité à long terme.

4. Si TAI est établi sans tenir compte des déterminations absolues de fréquence, comme c'est actuellement le cas, sa dérive en fréquence, après quelques années, est susceptible de dépasser les erreurs d'exactitude de ces déterminations absolues. Les données des étalons absolus de laboratoire sont donc d'une importance primordiale. Nous proposons de les utiliser suivant le schéma suivant.

4.1. Les calculs tels qu'ils sont proposés en 3.3 conduisent à une échelle de temps moyenne non asservie T' qui constitue une mémoire de fréquence à laquelle on pourra comparer les mesures absolues de fréquence faites pendant les quelques années passées.

4.2. TAI peut être déduit de T' en lui appliquant une variation de fréquence du même ordre de grandeur que celle qui peut être attendue pour T' et dont le signe tend à assurer l'égalité de l'intervalle unitaire de T' et de la seconde.

Note. Un algorithme applicable pour 3. a été établi. Les études nécessitées par la mise en pratique de 4. n'ont été qu'ébauchées ; leur poursuite dépend des décisions prises par les autorités de tutelle du B.I.H.

ANNEXE S 10

Installation de l'I.O.M. pour la conservation du temps

Par A. ORTE

Instituto y Observatorio de Marina (Espagne)

(Traduction du Document CCDS/72-43)

L'installation est constituée essentiellement de deux horloges à jet de césium Oscillatom B-5000. Ce modèle utilise le tube à césium H.P.-5082 A dont le fonctionnement comme étalon de temps et de fréquence est fondé sur l'emploi de deux boucles d'asservissement en cascade.

La boucle primaire contient un oscillateur à quartz de 6,3 MHz, d'une bonne pureté spectrale et d'une bonne stabilité à long terme, asservi sur la fréquence de transition au moyen d'une modulation de phase à 80 Hz. Le signal de correction est appliqué à l'oscillateur par l'intermédiaire d'un intégrateur et d'une diode à capacité variable.

La boucle secondaire comprend un oscillateur à quartz de 5 MHz de bonne stabilité à court terme. Sa fréquence est vérifiée par rapport à la fréquence de la boucle primaire au moyen d'un comparateur numérique et corrigée par un servo-moteur pas à pas. La période nominale de comptage choisie sur le comparateur détermine le rapport des fréquences des deux oscillateurs. Les corrections imposées par la théorie de l'instrument (champ C), ou toute autre correction souhaitée (telle que pour les échelles de temps coordonnées), peuvent être appliquées par une présélection appropriée du temps de comptage du comparateur.

Les spécifications garantissent une exactitude de 1×10^{-11} et une stabilité de 1×10^{-11} pour des périodes de mesure de 1 et 10 secondes.

L'extrapolation de l'échelle de temps définie par l'horloge à césium est obtenue, en cas d'interruption de la boucle principale, au moyen du fonctionnement indépendant de la boucle secondaire qui conserve le dernier réglage de fréquence reçu de l'oscillateur principal.

L'installation est complétée par :

- a) Un compteur numérique avec une résolution de 100 ns ;
- b) Un oscilloscope et un dispositif à retard de résolutions comparables ;
- c) Deux unités d'affichage numérique du temps B-1330 ;
- d) Un récepteur Loran-C LORCHRON, en fonctionnement permanent ;
- e) Un programmeur automatique de signaux horaires.

L'ensemble de l'installation est renforcé par une batterie d'accumulateurs extérieurs assurant une autonomie de plus de 24 heures en cas de panne du réseau.

Les horloges fonctionnent depuis le 21 janvier 1972 et, en ce moment, on les étudie par rapport à l'échelle de TAI. Leur mise à l'heure initiale a été faite à l'Observatoire de Neuchâtel avant leur envoi à San Fernando. Une seconde synchronisation a été faite par l'Observatoire de Paris après trois mois de fonctionnement continu.

Les comparaisons avec l'échelle de TAI sont assurées par la réception permanente des signaux Loran-C de Estartit (chaîne méditerranéenne) que l'on reçoit toute la journée de façon satisfaisante.

Grâce au transport d'horloge indiqué ci-dessus, on a déterminé la durée de propagation du Loran-C Estartit-San Fernando avec une exactitude de $\pm 1,5 \mu\text{s}$.

(16 juillet 1972)

ANNEXE S 11

Remarques sur le TUC comme base du temps légal

Par A. ORTE

Instituto y Observatorio de Marina (Espagne)

(Traduction du Document CCDS/72-14)

Les définitions légales du temps remontent au commencement de ce siècle et sont étroitement liées à l'adoption du méridien de Greenwich comme origine des longitudes. Ces règlements étaient nécessaires, principalement en raison de la navigation, des communications et des activités publiques.

En Espagne, la loi qui fixe l'heure légale, en liaison avec le "temps solaire moyen du méridien de Greenwich", date de 1900.

La définition de l'heure mentionnée ci-dessus a évolué surtout au cours des dernières décennies. Les concepts de TU1, TU2 et TUC ne sont en général pas sortis des milieux spécialisés, mais ils ont l'un après l'autre influencé, comme on sait, les émissions des signaux horaires qui sont dans la pratique considérés comme une bonne matérialisation de l'heure légale dont il est fait mention dans les lois. De plus, certains documents font référence aux signaux horaires comme issus de "services d'émission de l'heure légale".

Depuis janvier 1972, l'identification du TU, tel qu'il est mentionné dans les lois, avec le temps défini par les signaux n'est pas aussi correcte en raison de la tolérance admise aujourd'hui pour l'écart TU1-TUC (0,7 s).

Il apparaît convenable de conseiller de modifier les lois en recommandant l'emploi des mots "Temps Universel Coordonné" au lieu de toutes les autres dénominations qui sont à l'heure actuelle ambiguës, ou qui ne sont pas directement matérialisées par l'émission de signaux horaires qui demeureront toujours, dans la pratique, la référence pour la plupart des utilisateurs.

Si l'on propose une recommandation dans ce sens, il suffirait alors de se référer au TUC "des signaux horaires" en laissant à chaque pays la faculté de décider de ses propres systèmes internes de synchronisation et de la matérialisation du temps légal pour les besoins scientifiques, ces règlements internes étant la conséquence des améliorations scientifiques (nationales ou internationales).

On remarque que deux versions du TUC sont en usage :

TUC = TAI + $(n \pm 0,001)$ s navigation et communications,

TUC = TAI + ns (exactement) définition,

(n = nombre entier modifiable par échelons d'une unité) ;

la première version fera (si nécessaire) l'objet d'une recommandation internationale comme base du temps légal.

Des objections risquent d'être soulevées par certains utilisateurs du temps légal à cause des discontinuités d'une seconde du TUC. Malheureusement, peu de temps s'est écoulé depuis la première expérience d'un saut de 1 s et cela empêchera les membres du C.C.D.S. de tenir compte de ces objections.

(19 juin 1972)

ANNEXE S 12

Commentaires du N.P.L. (Royaume-Uni) pour la 6^e session du C.C.D.S.

Par J. McA. STEELE

(Traduction du Document CCDS/72-15)

1. ÉTALONS ATOMIQUES DE FRÉQUENCE

1.1. *Maser à hydrogène.*- On a effectué une étude approfondie du maser à hydrogène, comme étalon définitif. On a mis au point une méthode d'utilisation pour réduire l'effet d'entraînement par la cavité. L'effet de paroi et son coefficient de température ont été étudiés pour deux sortes de revêtements et on a mesuré la stabilité de l'effet de paroi sur une période de dix-huit mois. On peut interpréter les résultats concernant la stabilité soit comme une preuve que l'effet de paroi n'a pas changé de plus de 1×10^{-12} pendant cette période, soit comme une preuve que l'unité internationale définie par les étalons à césium n'a pas varié de plus de cette quantité. Avec cette exactitude, le maser constitue donc un étalon définitif indépendant.

1.2. *Étalon à jet de césium.*- L'étalon à long jet de césium dans lequel le jet peut être inversé dans le résonateur afin d'éliminer les erreurs de phase est resté disponible, bien que l'on ait utilisé comme étalon de travail un groupe indépendant d'étalons à césium commerciaux (Hewlett-Packard). On est en train de construire un nouvel étalon à césium pour lequel on s'efforce d'obtenir l'uniformité du champ magnétique. Il aura un champ C longitudinal et la distance entre les cavités d'excitation (TEO21) sera légèrement inférieure à 1 m. Il sera également possible de renverser la direction du jet.

2. RÉALISATION DE L'ÉCHELLE DE TAI

2.1. *Origine de l'échelle.*- L'origine actuelle de l'échelle de TAI, le 1^{er} janvier 1958, a l'avantage d'être utilisée depuis longtemps et d'être acceptée de façon générale ; les avantages que l'on retirerait d'un changement de cette origine ne semblent pas évidents. Avant cette date, on a constitué au Royaume-Uni et au B.I.H. des échelles atomiques fondées sur l'étalon à césium du N.P.L. qui fut mis en fonctionnement en juin 1955, mais l'uniformité de ces premières échelles était limitée par l'incertitude affectant leur unité ; cette incertitude fut d'abord de 1×10^{-9} , mais elle s'améliora par la suite jusqu'à 1×10^{-10} . Pour des comparaisons avec les échelles de temps astronomiques, il est évidemment souhaitable d'étendre l'échelle atomique aussi loin que possible dans le passé, mais on peut le faire sans avoir recours à un changement de l'origine de l'échelle.

2.2. *Unité de l'échelle.*- On s'accorde généralement maintenant sur le fait que l'unité de l'échelle de TAI est différente de la moyenne des unités fournies par les étalons qui contribuent actuellement à l'établissement de cette échelle. L'importance de cette différence dépendra beaucoup des poids relatifs attribués à ces étalons, et en particulier aux quelques étalons primaires par opposition au nombre bien plus grand d'étalons commerciaux. Selon la façon dont les poids sont répartis, la différence passe de quelques 10^{-13} à environ 10×10^{-13} , et, à ce niveau d'incertitude, on ne propose pas d'apporter un changement quelconque à l'unité de l'échelle. Il conviendra d'envisager un changement (par saut) de l'unité lorsque la prochaine génération d'étalons, primaires et commerciaux, aura été étudiée.

2.3. *Méthodes de pondération.*- On ne peut considérer que comme provisoire la méthode actuelle de pondération des différentes données qui contribuent à l'échelle de TAI. Il est clair qu'un poids égal donné à tous les contributeurs sauf un ne représente pas la situation statistique réelle et, en particulier, ne convient pas là où une échelle de temps locale est fondée sur un étalon primaire. Un système de pondération a priori présente des avantages tels que la simplicité et la souplesse, mais s'il doit être équitable il est nécessaire d'apporter quelque perfectionnement à la méthode actuelle. Cela impliquerait une évaluation détaillée de chaque laboratoire participant, et pour que

cela soit possible il est nécessaire d'obtenir de chaque laboratoire une information beaucoup plus complète sur ses étalons, leur environnement et les dispositions prises pour les comparaisons. Dans certains cas, ces informations sont déjà disponibles dans les publications, mais le fait de les fournir au B.I.H. d'une façon uniforme permettrait d'élaborer une méthode de pondération à niveaux multiples.

3. RELATIONS ENTRE LE C.C.D.S. ET D'AUTRES ORGANISATIONS

Il est évident que le C.C.D.S. et d'autres organisations, l'U.A.I., l'U.R.S.I., le C.C.I.R., ont des domaines de responsabilité qui se chevauchent. Il est toutefois heureux que dans la plupart des cas ce soient les mêmes personnalités qui siègent dans les différentes commissions et groupes d'étude de ces organisations ; il en résulte que les désaccords entre les décisions prises par ces organisations sont fort rares dans la pratique. Le C.C.I.R. a peut-être un rôle particulier du fait qu'il est chargé d'organiser à l'échelle mondiale un système d'émissions de signaux horaires et de fréquences étalons et que, pour cela, il compte sur les avis et l'aide des unions scientifiques. En particulier, il dépend du B.I.H. pour obtenir l'échelle de temps de référence de TUC et pour la diffusion des corrections et des ajustements nécessaires pour relier cette échelle au temps astronomique.

4. HEURE LÉGALE

Au Royaume-Uni, les émissions de signaux horaires MSF/GBR de la station de Rugby sont étroitement réglées sur le TUC(BIH) ; elles sont acceptées comme l'échelle de temps définitive (scientifique) pour le pays. L'horloge de Rugby détermine également l'heure donnée par le téléphone, tandis que d'autres étalons atomiques au Royal Greenwich Observatory, réglés sur le TUC(BIH), fournissent l'heure à la radiodiffusion nationale. Ainsi, bien qu'une base légale officielle n'existe pas, le temps civil correspond en pratique à l'échelle de TUC.

(26 juin 1972)

Rapport pour la 6^e session du C.C.D.S.

Radio Research Laboratories

et

National Research Laboratory of Metrology (Japon)

(Traduction du Document CCDS/72-16)

Ce rapport concerne l'ordre du jour de la 6^e session du C.C.D.S. et expose le point de vue des membres du Comité national japonais sur le temps et la fréquence.

1. PROGRÈS DES ÉTALONS ATOMIQUES DE FRÉQUENCE

A. Maser à hydrogène

Au Radio Research Laboratories, on a étudié l'exactitude et la stabilité de deux masers à hydrogène depuis la première observation de l'oscillation en 1966, tout en les utilisant comme étalons de référence.

Des expériences ont été effectuées surtout sur le revêtement des parois, en particulier des mesures du déplacement de fréquence pour des cavités de différents diamètres en fonction du matériau et du mode de revêtement. Les résultats montrent que l'effet de paroi le plus grand est observé avec le téflon solide ; viennent ensuite dans l'ordre : PTFE (DuPont, 30J), FEP (DuPont, 120J) et FEP (Daikin, DN1, Japon). A l'heure actuelle, c'est le DN1 qui donne la meilleure reproductibilité comme revêtement.

Une mesure récente avec des cavités revêtues de DN1 donne pour la fréquence non perturbée de l'hydrogène, par rapport à TA (R.R.L.), la valeur $1\,420\,405\,751,768 \pm 0,002$ Hz qui est très proche des valeurs du N.B.S. (1970), du N.P.L. (1970), du N.R.C. (1970-1971) et du L.S.R.H. (1971).

Comme il est souhaitable de faire une comparaison internationale avec des méthodes variées, le R.R.L. a essayé de faire une comparaison de fréquences de masers à hydrogène dans différents laboratoires en faisant circuler une cavité. L'expérience a duré sept mois en 1970-1971, avec la coopération la plus étroite et la plus amicale du N.R.C. (Canada).

Les valeurs mesurées de la fréquence de l'hydrogène dans les deux laboratoires concordent très étroitement et l'on n'a observé, dans les limites d'incertitude d'environ 2×10^{-13} , aucune modification de l'effet de paroi au cours de cette période. Les détails sont donnés dans le Rapport national du Japon à la Commission 1 de l'U.R.S.I. (1972), ainsi que dans un article de D. Morris (N.R.C.) publié dans *Metrologia*, 7, n° 4, 1971, p. 162.

Pour le fonctionnement continu de longue durée et l'amélioration de la précision des comparaisons de fréquences avec des étalons commerciaux à césium, on a employé une méthode automatique d'accord de la cavité utilisant la modulation de l'intensité du jet. D'autres recherches sur l'amélioration de l'exactitude et de la stabilité seront poursuivies au R.R.L.

B. Etalon à jet de césium

On a construit en 1971 au N.R.L.M. un résonateur à césium du type laboratoire. Le résonateur est du type horizontal avec une région d'interaction de 2,4 m et une optique du jet "en ruban". Des chariots mobiles sur lesquels sont montés un four et un détecteur sont installés aux deux extrémités de la chambre du jet, de telle sorte que la direction du jet peut être inversée tout en maintenant le vide.

On a confirmé expérimentalement que la largeur totale de résonance à mi-intensité est de 65 Hz. On estime que les stabilités à court terme sont meilleures que $3,6 \times 10^{-11}$ et 4×10^{-12} sur des durées de 0,1 et 10 s respectivement (écart-type déduit de la variance d'Allan). A l'heure actuelle, les recherches portent essentiellement sur l'amélioration de l'exactitude et de la stabilité.

2. RÉALISATION DE L'ÉCHELLE DE TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL

A. Ajustement de la fréquence (BIH)

Bien que ce problème touche la précision de la synchronisation entre le TUC et le TUC(i) dans les applications prati-

ques, il est lié dans son essence aux facteurs suivants :

- 1) limite d'exactitude des étalons à césium utilisés à l'heure actuelle dans chaque laboratoire ;
- 2) méthode actuelle d'établissement du TAI adoptée par le B.I.H.

En conséquence, il semble qu'il ne soit pas nécessaire de modifier la fréquence du B.I.H. immédiatement, mais un changement progressif pour atteindre la nouvelle fréquence peut être inévitable ; il sera déterminé quand on aura mis au point la nouvelle méthode de pondération.

B. Origine du TAI

Il n'est pas nécessaire d'apporter une modification à l'origine du TAI : $0^{\text{h}}0^{\text{m}}0^{\text{s}}$ 1^{er} janvier 1958, comme l'indique le paragraphe 4° de la "Mise en pratique du Temps Atomique International" (C.C.D.S., 5^e session, 1970, p. S 23).

C. Pondération des TA(i)

Bien que l'uniformité soit importante dans l'établissement du TAI pour les besoins pratiques, on considère que la chose la plus essentielle est l'exactitude avec laquelle on réalise le TAI comme échelle de temps constituée par l'intégration de la seconde du SI. Dans ce sens, on doit utiliser pour établir le TAI un nombre aussi grand que possible d'échelles de TA(i) conservées de façon indépendante dans les différents laboratoires mondiaux en utilisant une méthode convenable de pondération. Quand le nombre de TA(i) utilisés pour établir le TAI sera suffisamment grand, cela assurera également dans une certaine mesure l'uniformité du TAI.

3. RELATIONS ENTRE LE C.C.D.S. (C.I.P.M.), L'U.A.I., L'U.R.S.I. ET LE C.C.I.R.

Il semble que la situation actuelle convienne assez bien.

4. HEURE LÉGALE

Au Japon, il existe deux dispositions officielles concernant l'échelle de temps. L'une est une loi datant de 1886 ; elle contient un paragraphe qui établit que l'heure normale à utiliser de façon générale au Japon est celle du méridien de 135° de longitude est.

L'autre est une instruction du Ministère des Postes et Télécommunications révisée en 1971 et portant sur le fonctionnement de la station (JJY) de diffusion de l'heure et des fréquences étalons. Un paragraphe de cette instruction indique que l'heure normale diffusée est en avance de 9 heures sur le TUC.

Toutes les diffusions secondaires de l'heure au Japon, par la télévision, la radio ou le téléphone, suivent le nouveau système de TUC. Le premier ajustement de 1 seconde prévu pour le 1^{er} juillet 1972 a été annoncé officiellement par le Ministère des Postes et Télécommunications. Ainsi, l'heure normale fondée sur le nouveau système de TUC a été généralement utilisée dans la pratique.

On considère que l'avance de 9 h sur le TUC est une disposition prévue par la loi japonaise de 1886.

(27 juin 1972)

ANNEXE S 14

L'échelle de temps atomique de Greenwich

Par C. J. A. PENNY

Royal Greenwich Observatory (Royaume-Uni)

(Traduction d'un résumé du Document CCDS/72-17)

PÉRIODE DE JUIN 1955 À JUIN 1966

L'échelle de temps atomique de Greenwich a débuté en juin 1955 ; elle est fondée sur la définition de la seconde du SI comme durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133. L'origine de l'échelle a été choisie de façon à être en accord avec l'échelle de temps uniforme provisoire (PUT) du Royal Greenwich Observatory (R.G.O.), précurseur de TU2, à la mi-juin 1955.

De juin 1955 à juin 1966, l'échelle de temps atomique de Greenwich, GA, a été fondée sur le résonateur à césium à long jet du N.P.L. Elle était obtenue par intégration de la marche d'horloges à quartz sélectionnées situées au R.G.O., au N.P.L. et au Post Office Radio Branch Laboratory (P.O.) et déduite des comparaisons de fréquences entre ces horloges et le résonateur à césium.

Au cours de la première année, de juin 1955 à mai 1956, les moyennes en milieu de mois des mesures étaient communiquées au R.G.O., suivies par des valeurs sur cinq jours interpolées par le N.P.L. ; à partir de juillet 1959 les valeurs mesurées ont été fournies. Les comparaisons de fréquences entre les horloges à quartz du R.G.O. et du P.O. et l'horloge de référence du N.P.L. ont été faites de juin 1955 à mai 1957, par

réception du signal horaire de GBR dans les trois établissements, et de juin 1957 à juin 1966 par liaison téléphonique entre le R.G.O., le N.P.L. et le P.O. en utilisant des compteurs rotatifs de battements fonctionnant en permanence. De novembre 1958 à juin 1966, une autre possibilité de liaison était offerte par la réception et la mesure dans chaque établissement des émissions quotidiennes de fréquence étalon de la station MSF sur 60 kHz. La différence de fréquence obtenue, exprimée en fonction du résonateur à césium, au moyen de la liaison téléphonique et au moyen de la station MSF concordait dans les limites de $\pm 3 \times 10^{-10}$.

De mai 1955 à décembre 1963, les différences de fréquence avec le résonateur à césium pour un certain nombre d'horloges à quartz sélectionnées ont été transformées en marches sur cinq jours que l'on additionnait pour obtenir des comparaisons de temps. En faisant la différence entre deux quelconques de ces comparaisons de temps et en éliminant l'effet dû aux deux horloges à quartz, on a obtenu les différences entre deux intégrations des marches du résonateur à césium. Les deux intégrations ont montré de petites variations atteignant ± 7 ms pour les sept premiers mois, puis ont diminué jusqu'à ± 3 ms, et, à partir d'août 1957, n'ont pas dépassé $\pm 0,5$ ms. A partir de 1964 les sommes ont été calculées quotidiennement et les écarts entre les sommes correspondant à deux horloges différentes ont diminué jusqu'à ± 60 μ s pour les six premiers mois, et ensuite à quelques microsecondes seulement.

PERIODE DE JUILLET 1966 A JUIN 1972

En mai 1966, un étalon atomique commercial à jet de césium (Hewlett-Packard 5060 A) a été installé au R.G.O. pour la première fois ; il a été appelé CsA.

De juillet 1966 à avril 1967, GA a été déterminé à partir de la moyenne non pondérée de CsA à Herstmonceux et d'un étalon semblable au N.P.L. Les horloges étaient comparées au moyen de la liaison téléphonique et des compteurs rotatifs de battements. Le temps obtenu à partir de CsA a été ajusté à quelques microsecondes près avec celui obtenu à partir de l'étalon à césium à long jet du N.P.L., de telle sorte qu'il n'y eut aucune discontinuité dans GA.

D'octobre 1966 à mars 1967, les comparaisons des deux étalons à césium ont été faites en utilisant les mesures de la fréquence étalon MSF de 60 kHz.

En avril 1967, après un court chevauchement, CsA a été remplacé par CsB au R.G.O. En mai 1967, une différence persistante de fréquence de 3×10^{-12} s'établit entre l'étalon Hewlett-Packard du N.P.L. et l'étalon du R.G.O. et, à la suite d'autres preuves, on a éliminé de GA l'étalon du N.P.L. En octobre 1967, un contrôle avec une horloge voyageuse a confirmé que les étalons du R.G.O. concordait à $\pm 4 \times 10^{-13}$ avec un étalon Hewlett-Packard étalonné au National Bureau of Standards (Etats-Unis). En conséquence, à partir de mai 1967, GA a été déterminé seulement à partir des étalons à césium Hewlett-Packard du R.G.O.

Introduction de GA2. - En 1968, on a décidé d'adopter une échelle de temps atomique, GA2, présentant une différence constante avec GA :

$$GA - GA2 = 0,957\ 700\ s,$$

telle qu'elle soit en accord étroit avec TA, l'échelle de temps atomique du Bureau International de l'Heure, dont l'origine est le 1^{er} janvier 1958.

De mai 1967 au 31 mai 1970, on a pris pour constituer GA2 un seul étalon ou la moyenne non pondérée de deux étalons, sans correction de marche. Un étalon dont la fréquence changeait était éliminé et remplacé par un autre dès qu'il y en avait un de disponible. On ajustait le temps des étalons afin de ne provoquer aucune discontinuité dans GA2.

A partir du 1^{er} juin 1970, on a appliqué des corrections de marche appropriées aux nouveaux étalons, lorsqu'ils ont été mis en service pour la détermination de GA2. Lorsque la première correction a été appliquée à CsC le 1^{er} juin, un seul étalon, CsB, était en service car l'autre, CsD, avait eu un brusque changement de fréquence de $- 6,1 \times 10^{-12}$ le 13 mai et avait été éliminé de GA2. La correction de marche pour CsC a été déterminée pour annuler la différence entre la marche corrigée et la marche de l'échelle de temps atomique du B.I.H. Lorsqu'on a introduit la nouvelle horloge, le 1^{er} novembre 1970 et par la suite, on a déterminé les corrections de marche de façon à n'occasionner aucun changement dans la fréquence de GA2.

Depuis le 1^{er} mai 1967, le R.G.O. a eu jusqu'à cinq étalons commerciaux à césium disponibles et on a déterminé GA2 à partir d'un seul étalon ou de la moyenne non pondérée de plusieurs de ces étalons.

Il est peut-être significatif que les deux étalons à césium dont le fonctionnement ne fut pas interrompu, CsB et CsE, présentent de petites différences de fréquence avec

l'échelle de TAI, de l'ordre de quelques 10^{-13} . Dans la formation de GA2, on considère comme significatifs des changements de fréquence de 5×10^{-13} ou plus : à cet égard, il est évident que l'exactitude des meilleurs étalons commerciaux est meilleure d'un ordre de grandeur que l'exactitude annoncée, c'est-à-dire 1×10^{-11} .

Au cours de la période janvier 1970 à mai 1972, la différence TA-GA2 n'a pas dépassé 2,3 μ s.

ÉTABLISSEMENT DES ÉCHELLES DE TEMPS ATOMIQUE

En théorie, un minimum de trois étalons à césium est nécessaire pour constituer une échelle de temps atomique uniforme, puisqu'on peut déceler un changement de la marche d'un étalon par comparaison avec les deux autres étalons. En pratique, il semble qu'il soit nécessaire de maintenir au moins cinq étalons en fonctionnement, en raison des changements de fréquence imprévisibles de quelques 10^{-12} qui surviennent de temps en temps pour certains de ces étalons.

Afin de conserver une échelle de temps atomique indépendante et uniforme, il est nécessaire d'appliquer des corrections de marche aux nouveaux étalons qui sont introduits dans l'échelle de façon à conserver inchangée la fréquence de l'échelle. Il s'ensuit qu'après un certain temps l'échelle ne représente plus la moyenne véritable ou la meilleure estimation des étalons sur laquelle elle est fondée, mais perpétue aussi loin que possible l'échelle originale. Dans le cas de GA2 il semble très heureux que les fréquences des deux premiers étalons, CsA et CsB, aient concordé à 2×10^{-13} près et que GA2 coïncide aussi étroitement avec le TAI. Il pourrait facilement arriver que l'on ne décèle pas de petits changements de fréquence et, sauf si ces changements sont aléatoires, il est évident qu'ils s'accumuleront et qu'à la longue la fréquence de n'importe quelle échelle changera peu à peu. Il ne semble pas raisonnable de conserver l'uniformité de l'échelle au prix d'avoir une échelle "moyenne" entièrement fictive dans laquelle les intervalles s'écarteront de la seconde du SI. Au R.G.O., on publie maintenant dans les "Greenwich Time Reports" les différences entre GA2 et les horloges atomiques non corrigées, de telle sorte que l'on dispose des résultats du fonctionnement réel des différentes horloges et que l'on peut en faire une moyenne véritable. Maintenant qu'il existe un certain nombre d'étalons à césium commerciaux en

fonctionnement, dont certains de très grande qualité, il conviendrait de reconsidérer le problème de l'uniformité des échelles de temps atomique. Il se peut que l'uniformité ne doive pas maintenant primer sur toutes les autres considérations.

DEFINITION D'UN JOUR ATOMIQUE

Actuellement, on fait les comparaisons d'horloges atomiques à un instant spécifié en Temps Universel, en pratique TUC, et le décompte de l'échelle de temps atomique est fait en jours juliens, c'est-à-dire en jours de TU. Lors de l'introduction du nouveau système de TUC le 1^{er} janvier 1972, le B.I.H. a proposé, et c'est ce qu'il a fait dès le début, de décompter l'échelle de temps atomique en jours atomiques, à partir de son origine le 0 janvier 1958. Cela conduisit à une différence de 0,3 μ s entre le TAI tel qu'il est calculé par le B.I.H. et tel qu'il est calculé par certains laboratoires participants. Malheureusement, après quelques échanges de vues par correspondance, le B.I.H. s'est laissé persuader d'abandonner le décompte en jours atomiques essentiellement, semble-t-il, parce que certains objectaient qu'un "jour atomique" n'avait pas été défini. Il est tout à fait illogique de décompter une échelle de temps atomique en jours de Temps Universel ; il conviendrait d'entamer maintenant une discussion sur l'adoption d'un jour atomique de 86 400 secondes atomiques.

DEFINITION DE L'HEURE LEGALE

On attendra probablement que le C.I.P.M. fasse des recommandations avant d'envisager tout changement de la définition légale de l'heure civile au Royaume-Uni. Il convient de noter que les signaux horaires définissent de facto l'heure civile. Il est vraiment difficile de concevoir une situation dans laquelle les signaux horaires radiodiffusés ne fourniraient une heure civile légale qu'après application de corrections changeant continuellement. Compte tenu de l'accord étroit maintenu avec le TU par les signaux horaires, il existe des raisons pratiques de prendre le TUC comme base de l'heure civile légale. Aucun conflit ne surgirait alors entre l'heure civile légale et la seconde du SI telle qu'elle est définie par le C.I.P.M. Il conviendrait de reconsidérer cette situation si, dans le futur, on envisageait la possibilité d'une divergence plus grande entre le TUI et le TUC.

ANNEXE S 15

Commentaires pour la 6^e session du C.C.D.S.

Par G. M. R. WINKLER

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

(Traduction du Document CCDS/72-19)

A. ÉTALONS ATOMIQUES DE FRÉQUENCE EXISTANTS

Seuls les étalons de fréquence à jet de césium et les masers à hydrogène sont dignes d'intérêt pour le moment en ce qui concerne la conservation du temps à long terme.

Il est évident que des progrès considérables ont été réalisés avec ces deux types d'appareils au cours des trois dernières années.

Aux Etats-Unis, les recherches sur les masers à hydrogène ont continué dans les centres suivants :

- à l'Université Harvard (en insistant sur l'aspect physique de l'effet de paroi) ;

- au Smithsonian Astrophysical Observatory, sous la direction du Dr Vessot, pour les oscillateurs locaux VLBI et pour les horloges de satellites ;

- au Goddard Space Flight Center de la N.A.S.A., sous la direction de H. Peters, pour fournir des références de fréquences ultra-stables pour la physique terrestre et l'expérimentation de systèmes de poursuite ;

- au National Bureau of Standards (N.B.S., Boulder), sous la direction du Dr Halford, pour explorer les possibilités des étalons de fréquence ;

- au Jet Propulsion Laboratory, sous la direction du Dr Higa, à l'appui des programmes VLBI dans le réseau de poursuite spatiale.

H. Peters a réussi le premier à faire fonctionner un appareil à jet d'hydrogène, qui permettra d'observer la fréquence de l'hydrogène sans que celle-ci ne soit dégradée par un effet d'entraînement par la cavité ou un effet de paroi. Le groupe du N.B.S. a fait progresser le concept nouveau d'un "tube à jet avec stockage" ("storage beam tube").

Au Naval Research Laboratory (N.R.L.) et à l'U.S. Naval Observatory (U.S.N.O.), qui sont reliés par micro-ondes, on a fait fonctionner des masers du type "Varian" (séries 1, 2 et 10) en les comparant de façon constante à l'ensemble d'horloges de l'U.S.N.O.

La Société Hewlett-Packard a présenté deux nouveaux appareils à jet de césium : un petit appareil (de stabilité égale à 10^{-11} ou meilleure) pour utilisation dans les avions et un étalon de fréquence à césium de type "laboratoire" à performances élevées, qui devrait avoir une stabilité meilleure que

$$\sigma_y(2, \tau) \leq \frac{10^{-11}}{\sqrt{\tau}}, \text{ pour } \tau < 10^5 \text{ s environ.}$$

Un court essai d'un étalon prototype a été fait au N.R.L., où des mesures ont été effectuées par comparaison à un des masers à hydrogène avec d'excellents résultats. Cet appareil, lorsqu'il sera fabriqué en série, constituera sans aucun doute un important progrès pratique. La raison de ces succès tient essentiellement aux progrès faits dans le blindage, au meilleur rapport signal/bruit et à la meilleure démagnétisation.

En conclusion, il apparaît encore que le choix de la résonance du césium comme base de la définition de l'échelle de temps atomique fut un choix sage. Il convient toutefois de suivre de près la réalisation de H. Peters, car il se peut que cet appareil soit susceptible d'une exactitude meilleure que celle de l'atome de césium.

B. LE TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL (TAI)

1. Buts.— La définition de la seconde se réfère à l'atome de césium dans le référentiel local. Effectivement, la disponibilité de l'étalon dans le laboratoire est le plus grand avantage pratique de la nouvelle définition. En conséquence, considérer TAI principalement comme une mise en oeuvre de la définition de la seconde constituerait un pas en arrière. Ce n'est pas cela ; TAI est une échelle de temps coordonné étalon ayant pour buts :

- a) de servir de référence pour la coordination des horloges ;
- b) de fournir une aide pour les comparaisons à long terme d'étalons de fréquence.

Ces deux buts exigent la stabilité de la fréquence. L'exactitude ne présente qu'un intérêt secondaire.

2. Marche du TAI.— Il ressort d'une longue expérience pratique que la meilleure façon d'obtenir une échelle de temps réellement fiable est de faire la moyenne d'un grand nombre d'horloges. Avec des horloges à césium, une telle méthode peut également donner une marche suffisamment précise pour les utilisations pratiques. Il est toutefois nécessaire d'éliminer tous les écarts systématiques et de vérifier la marche (résultant d'une méthode donnée de calcul de la moyenne) sur de longs intervalles (2 ans ?) d'après la fréquence réelle moyenne de toutes les horloges à césium participantes. De tels procédés donneront une marche d'horloge qui sera la même que celle que "l'utilisateur moyen" produit et c'est tout ce dont nous avons besoin. A cet égard, nous trouvons la marche de l'échelle du B.I.H. uniformément élevée et je conseillerais qu'elle soit diminuée de 5×10^{-13} .

3. "Pondération".— Ce concept, si répandu dans d'autres domaines de la métrologie, a conduit à un certain nombre de malentendus dans les applications relatives à la mesure du temps. De plus, je crois que l'utilisation de la pondération dans toute échelle de temps calculée conduit à :

- a) une perte de "transparence" des opérations ;
- b) une diminution de la fiabilité en raison du petit nombre d'unités qui interviennent ;
- c) une surestimation de l'uniformité obtenue.

Toutefois, la principale difficulté que j'éprouve à accepter les méthodes courantes de pondération pour obtenir une échelle de temps est plus fondamentale. En principe, nous n'avons effectivement aucune façon de comparer deux intervalles de temps, si ce n'est en admettant l'ergodicité des processus qui commandent le comportement de groupes d'horloges. Nous devons nous fier à la comparaison d'un grand nombre d'horloges, sinon les concepts statistiques sont tout simplement injustifiés.

En d'autres termes, nous acceptons comme temps "étalon" la moyenne de toutes les horloges "retenues". Il est bien évident que nous ne pouvons pas faire la moyenne de toutes les horloges et montres, mais que nous devons choisir les horloges

que nous pouvons considérer comme des horloges étalons. Ce premier choix n'a absolument rien à voir avec la pondération.

Un autre point est également essentiel. Si, en effet, notre hypothèse de départ est exacte, il devrait en résulter une indépendance statistique non seulement entre les horloges à tout moment, mais aussi entre le fonctionnement d'une horloge donnée à l'instant t_1 et le fonctionnement de la même horloge à un autre instant t_2 . Il est évident que cela n'est qu'une approximation. Toutefois, cela signifie que nous devons nous servir de chaque horloge selon son fonctionnement au moment de l'utilisation et non au cours des intervalles antérieurs. Cette façon de voir conduit au système de conservation du temps que nous utilisons à l'U.S.N.O. (1).

On pourrait également proposer l'approche suivante :

Le B.I.H. ne devrait retenir parmi les institutions nationales de conservation du temps que celles qui ont au moins trois horloges à jet de césium ou masers à hydrogène disponibles (en plus des autres conditions pratiques requises). Seuls, ces centres seront en mesure d'apporter une contribution suffisamment fiable, relativement préservée de grands écarts catastrophiques. Il est alors raisonnable d'admettre que les procédures internes donneront des échelles de temps individuelles sujettes à des fluctuations aléatoires de marche inversement proportionnelles à la racine carrée du nombre n des horloges participantes. Cela constitue par conséquent pour le B.I.H. la base pour attribuer au participant le poids \sqrt{n} dans la méthode de calcul décrite dans le Rapport Annuel du B.I.H. pour 1970 (pp. 19-23).

Ma préférence est pour cette seconde méthode avec des poids "a priori", car elle est plus pratique pour le B.I.H.

De plus, je recommande que chaque établissement participant fournisse régulièrement au B.I.H. des informations sur son groupe d'horloges.

4. Questions de relativité.— Je recommande que l'on continue de ne tenir aucun compte des effets dus aux différences de potentiel gravitationnel dans les résultats communiqués au B.I.H., puisque ces effets sont constants et qu'ils ne doivent être retenus que dans le contexte du paragraphe B.2 (corrections de la marche à long terme). Toutefois, il peut être intéressant de noter que la récente expérience de Hafele et

(1) Voir *Metrologia*, 6, N° 4, 1970, p. 126.

Keating⁽²⁾ ne laisse persister aucun doute sur le fait que les procédés de synchronisation terrestre ne sont pas transitifs (ils dépendent de la direction par rapport à la rotation de la Terre) comme cela est prévu par la théorie de la relativité générale.

5. Aspects légaux.— On devrait se limiter à discuter de cette question avec les personnes bien au courant des problèmes impliqués. Je ne vois pour ma part aucune nécessité de modifier l'idée que le TUC est une approximation pratique du TU, comme auparavant.

(25 janvier 1972)

(2) Around-the-world atomic clocks : predicted and observed relativistic time gains, *Science*, 177, N° 4044, pp. 166-170.

ANNEXE S 16

Note sur l'emploi de « GMT »

Par G. M. R. WINKLER

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

(Traduction)

1. RAPPEL HISTORIQUE

Avant 1925, "GMT" (Greenwich Mean Time) désignait le Temps moyen de Greenwich, c'est-à-dire l'angle horaire du soleil "moyen" au méridien de Greenwich, Angleterre. Le jour commençait à midi. Lorsque le jour "civil", commençant à minuit, fut introduit dans les éphémérides anglaises en 1925, l'éphéméride américaine a adopté l'expression "Greenwich Civil Time (GCT)" (Temps Civil de Greenwich) pour l'heure moyenne comptée à partir de minuit. Toutefois, le Nautical Almanac a continué d'utiliser GMT pour désigner la nouvelle heure. Sur la recommandation de l'U.A.I., l'éphéméride américaine a adopté le terme "Universal Time (UT)" [Temps Universel (TU)], alors que les publications destinées à la navigation pour les pays de langue anglaise continuaient à employer GMT (maintenant compté à partir de minuit au méridien de Greenwich).

2. INDICES

Lorsque la précision de la conservation et de la détermination du temps a augmenté, il devint nécessaire de faire une distinction entre le temps tel qu'il est déterminé et l'heure d'horloge ("signal") ; cette distinction a été faite en introduisant des indices TU0, TU1, TU2 et TUC. La distinction entre

le temps observé (TU0, TU1) et l'heure d'horloge (TUC) est même plus importante qu'auparavant, car leur différence peut atteindre 0,7 s à cause des nouvelles méthodes qui ont été introduites le 1^{er} janvier 1972. Pour les utilisations dans lesquelles cette différence est sans importance, on peut omettre les indices. Dans ce sens, l'expression TU est largement employée ; elle équivaut à GMT dans certaines publications destinées aux navigateurs et au temps "Z" dans les communications.

3. RECOMMANDATION

On recommande fortement l'emploi des expressions TU0, TU1, TU2 et TUC acceptées dans les milieux scientifiques. Elles sont bien définies et non ambiguës ; elles se rapportent à l'heure comptée à partir de minuit, même pour des époques antérieures à 1925. Toute utilisation nouvelle de GMT doit être découragée et aucune expression nouvelle ne doit être introduite en ce moment.

(23 mai 1972)

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE 6^e Session (1972)

	Pages S
Notice historique sur les organes de la Convention du Mètre	5
Liste des membres	7
Ordre du jour	10
Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par B. Guinot	11
Hommage à la mémoire de H. Barrell, ancien président du C.C.D.S., décédé en 1972	12
Progrès de l'instrumentation : Revue des travaux effectués dans les laboratoires (N.B.S. et autres laboratoires aux États-Unis, N.R.C., P.T.B., N.P.L., I.E.N., L.H.A.) sur les étalons atomiques de fréquence et sur leur emploi	12
Formation du Temps Atomique International (TAI) (Travaux du B.I.H. Considérations sur la stabilité à long terme et l'exactitude de TAI; discussion. Adoption de la Recommandation S 1 relative à l'envoi au B.I.H. des informations concernant les horloges individuelles)	15
Calendrier lié au TAI (Les propositions de la P.T.B. seront examinées ultérieurement. Adoption de la Recommandation S 2 qui attire l'attention sur ces problèmes et appelle la collaboration des organisations intéressées)	19
Aspect légal du TUC (Intérêt de cette question; adoption d'une déclaration du C.C.D.S.)	20
Questions diverses :	
— Rôles respectifs des divers organismes s'occupant du temps	21
— Étalons de fréquence optiques (Un comité consultatif approprié devrait s'occuper à l'avenir des mesures maintenant connexes de longueur, de temps et de la vitesse de la lumière)	21
— Désignation du Temps Atomique International (L'emploi dans toutes les langues du sigle TAI est souhaité)	21
Recommandations et Déclaration présentées au Comité International des Poids et Mesures :	
<i>Recommandation S 1 (1972) (Envoi au Bureau International de l'Heure d'informations concernant les horloges individuelles)</i>	<i>22</i>

<i>Recommandation S 2 (1972) (Conséquences de l'adoption du Temps Atomique International pour les échelles de temps utilisées pour la vie courante)</i>	22
<i>Déclaration sur l'usage légal du Temps Universel Coordonné</i>	22
Plan de travail du Bureau International de l'Heure pour l'amélioration du Temps Atomique International	23

Annexes

S 1. <i>Documents de travail présentés à la 6^e session du C.C.D.S.</i>	24
S 2. P.T.B. (Allemagne). — <i>Le système de Temps Universel Coordonné (TUC) et le problème des échelles officielles de temps</i> , par G. Becker.	27
S 3. <i>Propositions de la P.T.B. (Allemagne) concernant l'ordre du jour de la 6^e session du C.C.D.S.</i>	31
S 4. <i>Commentaires du N.R.C. (Canada) pour la 6^e session du C.C.D.S.</i>	33
S 5. <i>Activité de l'I.E.N. (Italie) dans le domaine des étalons atomiques de fréquence</i>	39
S 6. I.E.N. (Italie). — <i>Filtrage des échelles de temps</i>	41
S 7. <i>Propositions et rapports de la P.T.B. (Allemagne) pour la 6^e session du C.C.D.S.</i> , par G. Becker	43
S 8. P.T.B. (Allemagne). — <i>Comparaisons de fréquences avec l'étalon CSI de la P.T.B.</i> , par G. Becker	51
S 9. B.I.H. — <i>Conclusions des études tendant à assurer la stabilité et l'exactitude du Temps Atomique International</i> , par B. Guinot	54
S 10. Instituto y Observatorio de Marina (Espagne). — <i>Installation de l'I.O.M. pour la conservation du temps</i> , par A. Orte	56
S 11. Instituto y Observatorio de Marina (Espagne). — <i>Remarques sur le TUC comme base du temps légal</i> , par A. Orte	58
S 12. <i>Commentaires du N.P.L. (Royaume-Uni) pour la 6^e session du C.C.D.S.</i> , par J. McA. Steele	60
S 13. R.R.L. et N.R.L.M. (Japon). — <i>Rapport pour la 6^e session du C.C.D.S.</i>	63
S 14. R.G.O. (Royaume-Uni). — <i>L'échelle de temps atomique de Greenwich (Résumé)</i> , par C. J. A. Penny	67
S 15. U.S. Naval Observatory. — <i>Commentaires pour la 6^e session du C.C.D.S.</i> , par G. M. R. Winkler	72
S 16. U.S. Naval Observatory. — <i>Note sur l'emploi de « GMT »</i> , par G. M. R. Winkler	77

IMPRIMERIE DURAND

28600-LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1973, n° 1881

Dépôt légal, Éditeur, 1973, n° 23

ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 1973-10-01

Imprimé en France