

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE
SESSION DE 1970

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

COMITÉ CONSULTATIF

POUR

LA DÉFINITION DE LA SECONDE

5^e SESSION — 1970

(18-19 juin)



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Pavillon de Breteuil, F 92-SÈVRES, France

Dépositaire: OFFILIB, 48 rue Gay-Lussac, F 75-Paris 5

AVERTISSEMENT HISTORIQUE

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

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

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

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

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

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

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

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

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

(1) Au 31 décembre 1970, quarante États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne, Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Canada, Chili, Corée, Danemark, Dominicaine (Rép.), Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Irlande, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République Arabe Unie, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Vénézuéla, Yougoslavie.

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

Les Comités Consultatifs ont un règlement commun (*Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 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, ainsi que de membres individuels désignés également par le Comité International. Ces Comités tiennent leurs sessions à des intervalles irréguliers; ils sont actuellement au nombre de sept :

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

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

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

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

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

Depuis 1965 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 divers organismes issus de la Convention du Mètre.

Comité International des Poids et Mesures

<i>Secrétaire</i>	<i>Vice-Président</i>	<i>Président</i>
J. DE BOER	J. 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* (B. GUINOT, Directeur; M. GRANVEAUD, Ingénieur).

BUREAU DES LONGITUDES, *Paris* (J. KOVALEVSKY, Astronome titulaire).

COMITÉ CONSULTATIF INTERNATIONAL DES RADIOCOMMUNICATIONS [C.C.I.R.] de l'Union Internationale des Télécommunications, *Genève* (J. T. HENDERSON, Chairman Study Group 7).

COMMISSION NATIONALE DE L'HEURE, *Paris* (B. DECAUX).

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES [N.R.C.], *Ottawa* (H. DAAMS, Associate Research Officer).

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* (B. I. VLASSOV, Chef de section).

ISTITUTO ELETTROTECNICO NAZIONALE GALILEO FERRARIS [I.E.N.], *Turin* (C. EGIDI, Chef du Département Radiotechnique; S. LESCHIUTTA, Chef de la Section « Temps et Fréquence »).

- LABORATOIRE DE L'HORLOGE ATOMIQUE DU CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE, *Besançon, Bagnoux, Orsay* (M. ARDITI, Directeur de Recherches; M. AUDOIN, Maître de Recherches).
- LABORATOIRE SUISSE DE RECHERCHES HORLOGÈRES [L.S.R.H.], *Neuchâtel* (P. KARTASCHOFF, Directeur de la Division « Chronométrie »).
- NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [N.B.S.], *Boulder* (J. A. BARNES, Chief, Time and Frequency Division).
- NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [N.P.L.], *Teddington* (J. McA. STEELE, Division of Electrical Science).
- NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY [N.R.L.M.], *Tokyo*.
- PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [P.T.B.], *Brauns hweig* (G. BECKER, Direktor).
- RADIO RESEARCH LABORATORIES [R.R.L.], *Tokyo*.
- ROYAL GREENWICH OBSERVATORY [R.G.O.], *Hailsham* (H. M. SMITH).
- UNION ASTRONOMIQUE INTERNATIONALE [U.A.I.] (H. M. SMITH; B. GUINOT).
- U.S. COAST GUARD [U.S.C.G.], *Washington* (H. S. PEARSON, Chief, Office of Engineering; C. E. POTTS, Engineer).
- U.S. NAVAL OBSERVATORY [U.S.N.O.], *Washington* (G. M. R. WINKLER, Director, Time Service).
- J. BONANOMI, Observatoire de Neuchâtel, *Neuchâtel*.
- A. ORTE, Instituto y Observatorio de Marina, *San Fernando*.
- Le directeur du Bureau International des Poids et Mesures [B.I.P.M.], *Sèvres* (J. TERRIEN).
-

ORDRE DU JOUR DE LA SESSION

1. Progrès des étalons atomiques de fréquence.
 2. État actuel des échelles atomiques de temps fondées sur la définition de la seconde.
 3. Définition d'une échelle de temps atomique international tenant compte, en particulier, des effets relativistes.
 4. Maintien et diffusion de cette échelle de temps atomique international; tâches respectives du B.I.H. et du B.I.P.M. dans le proche avenir et dans un avenir plus lointain; crédits financiers à demander à la Conférence Générale des Poids et Mesures.
 5. Questions soulevées par l'existence conjointe d'échelles astronomiques de temps.
 6. Questions diverses.
-

COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE

5^e SESSION (1970)

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 cinquième session au Pavillon de Breteuil à Sèvres, les jeudi 18 et vendredi 19 juin 1970.

Étaient présents : Mr DUNWORTH, président; MM. ARDITI, AUDOIN, BARNES, BECKER, BONANOMI, DAAMS, DECAUX, EGIDI, GRANVEAUD, GUINOT, HENDERSON, KARTASCHOFF, KOVALEVSKY, LESCHIUTTA, ORTE, PEARSON, POTTS, SMITH, McA. STEELE, TERRIEN, VLASSOV, WINKLER.

Assistaient également aux séances : Mr MARÉCHAL, membre du Comité International des Poids et Mesures; MM. GIACOMO et CARRÉ (Bureau International); Mme Kalintseva, interprète.

Absents : Deutsches Amt für Messwesen und Warenprüfung, Berlin; National Research Laboratory of Metrology, Tokyo; Radio Research Laboratories, Tokyo.

Le *Président* ouvre la séance et transmet au Comité Consultatif les vœux de succès de la part de Mr Barrell, président du C.C.D.S. lors des 3^e et 4^e sessions. Mr Decaux, qui avait rempli les fonctions de rapporteur lors des réunions antérieures du C.C.D.S., a demandé à ne plus assurer cette fonction. Après avoir remercié Mr Decaux pour le travail qu'il a accompli, le Président propose de confier la tâche de rapporteur à Mr Guinot; cette proposition est approuvée.

Après les souhaits de bienvenue, le Président demande si l'on souhaite des additions à l'ordre du jour. Mr Barnes propose d'inclure dans le point 1 une discussion sur la relation entre les unités de temps et de longueur. On passe ensuite à l'examen des différents points de l'ordre du jour.

1. Progrès des étalons atomiques de fréquence

Les documents distribués dispensant d'exposés complets, le Président invite MM. Barnes, Becker et Kartaschoff à en résumer les points les plus importants.

Mr *Barnes* expose les travaux accomplis au National Bureau of Standards (Boulder) sur le laser hélium-néon asservi sur une raie d'absorption saturée du méthane. Trois sources ont été construites et leurs fréquences sont en accord à 10^{-11} près; par comparaison des sources entre elles, on constate des stabilités de 1×10^{-14} . Toutes les causes d'erreurs sur les fréquences n'ont pas encore été évaluées; l'effet de recul des molécules sous l'action des photons peut introduire une asymétrie sur le profil de la raie conduisant à une erreur de 1×10^{-11} . La synthèse des fréquences jusqu'à la fréquence du méthane (10^{14} Hz) reste un problème délicat. Jusqu'à présent, la fréquence la plus élevée mesurée d'une manière absolue atteint seulement un tiers de la fréquence du méthane.

Mr *Becker* fait le point sur les progrès des étalons à jet de césium. Il distingue les étalons de temps commerciaux et ceux construits par les laboratoires. Les étalons commerciaux ont des possibilités bien connues : inexactitude de l'ordre de 1×10^{-11} , défaut de stabilité sur un an de quelques 10^{-13} . Les étalons de laboratoire continuent à faire l'objet de recherches en vue d'améliorer leur exactitude. Les progrès sont liés à l'amélioration du champ magnétique et à la cohérence de phase des deux cavités de Ramsey. Le champ donne une limite d'exactitude de 10^{-14} . Pour réduire les effets dus à la dissymétrie entre les cavités, on peut soit moduler la vitesse des atomes (méthode appliquée à la Physikalisch-Technische Bundesanstalt), soit renverser le jet (méthode essayée dans plusieurs laboratoires). A présent, les meilleurs étalons ont une exactitude d'environ 5×10^{-13} . Les étalons de laboratoire ne fonctionnent pas d'une façon continue; des étalons secondaires doivent garder la mémoire de leur fréquence : cela peut être le rôle des étalons commerciaux qui fonctionnent comme des horloges.

Mr *Becker* précise que, à présent, l'exactitude des étalons à jet de césium est limitée par l'effet Doppler du second ordre. L'amélioration future exigera une connaissance précise de la vitesse des atomes.

Mr *Kartaschoff* expose les problèmes rencontrés dans le développement du maser à hydrogène. Par comparaison avec les étalons à césium, les masers à hydrogène montrent des désaccords entre leurs fréquences de l'ordre de quelques 10^{-12} ; ces désaccords sont dus essentiellement aux effets de paroi dans le ballon de stockage. Pour extrapoler la fréquence pour un effet de paroi nul, il n'est pas suffisant d'avoir deux ballons de dimensions différentes : en effet, on peut ainsi être conduit à une erreur de 3×10^{-12} . Des mesures répétées au National Bureau of Standards et

à l'Université Harvard, avec un très grand nombre de ballons, ont conduit à une valeur améliorée de la fréquence de l'hydrogène :

$$1\,420\,405\,751,768 \pm 0,002 \text{ Hz.}$$

De nouvelles méthodes pour mesurer l'effet de paroi sont en cours de mise au point : utilisation d'un très grand ballon (au prix de difficultés de revêtement), utilisation d'un ballon déformable à surface constante (Université Harvard), recherche de la température à laquelle l'effet de paroi est nul, recherche sur un étalon à jet d'hydrogène avec ballon de stockage intermédiaire. En conclusion, il n'apparaît pas impossible que l'étalon à hydrogène puisse surpasser l'étalon à césium comme étalon d'intervalle de temps, et les recherches doivent continuer.

2. État actuel des échelles atomiques de temps fondées sur la définition de la seconde

Mr *Guinot* donne quelques indications sur les principes qui l'ont guidé pour établir l'échelle de temps atomique international du Bureau International de l'Heure (B.I.H.), les détails du mode de calcul actuel étant publiés dans le Rapport annuel du B.I.H. pour 1969. Historiquement, l'intérêt du B.I.H. pour le temps atomique a été motivé par le désir d'avoir une référence pour étudier la rotation terrestre; cependant, l'échelle du B.I.H. a suivi les progrès techniques de sorte que son usage puisse être aussi étendu que possible. L'échelle du B.I.H. est une échelle moyenne, fondée sur toutes les informations envoyées au Bureau. La mise en pratique, à la fin de 1968, de comparaisons de temps dans le domaine de la microseconde par transport d'horloge, par télévision et surtout par la réception des impulsions de Loran-C, a imposé un choix dans les critères de l'échelle du B.I.H. Ce choix découle des propriétés des étalons de temps commerciaux qui sont presque exclusivement utilisés pour former l'échelle, propriétés rappelées par Mr Becker. L'excellente stabilité à long terme de ces étalons permet de construire une échelle d'un haut degré d'uniformité. Mais la comparaison de l'unité de l'échelle avec la durée de la seconde telle qu'elle est fournie par les étalons primaires des laboratoires pourrait révéler des défauts d'exactitude.

Mr *Guinot* souhaite recevoir de la part du C.C.D.S. des indications sur les compromis à adopter pour avoir à la fois une bonne exactitude et une bonne uniformité. Le compromis adopté à présent par le B.I.H. en l'absence d'indications de la part des Unions scientifiques, est de conserver l'uniformité aussi longtemps que possible et d'ajuster l'unité de l'échelle par saut de fréquence seulement si les expériences des laboratoires montrent un défaut d'exactitude significatif.

Le *Président* rappelle que, directement ou indirectement, les États-Unis d'Amérique ont un rôle prépondérant dans l'établissement du temps

atomique. Il invite Mr Winkler à parler de l'échelle de temps de l'U.S. Naval Observatory de Washington et Mr Potts du système Loran-C.

L'échelle de l'U.S. Naval Observatory avait d'abord été établie sur une base internationale. Mr *Winkler* explique qu'elle est établie maintenant à l'aide d'un groupe d'étalons commerciaux et de masers à hydrogène de cet observatoire (Annexe S 7). Le mode de calcul exposé garantit une grande uniformité; on peut s'assurer en outre, par considération de différents groupes d'étalons, que l'échelle est aussi très exacte, sans doute à $\pm 5 \times 10^{-13}$. L'échelle de l'U.S. Naval Observatory sert de référence pour des systèmes techniques (navigation, recherche spatiale) et aussi pour l'astronomie (représentation pratique du temps des éphémérides). Pour les systèmes techniques, l'uniformité est d'une importance primordiale, de sorte que les précautions sont prises pour que l'introduction ou le retrait d'horloges contribuant à la formation de l'échelle de temps n'apporte pas de sauts de fréquence. La distribution de cette échelle est réalisée par les émissions de fréquences étalons sur ondes très longues, par Loran-C (précision : 0,5 μ s), par télévision et aussi, expérimentalement, par satellites. Mr *Winkler* insiste sur le fait que les comparaisons de temps très précises entre horloges distantes n'ont couramment lieu que depuis un ou deux ans; il convient donc d'être prudent, notamment pour les pondérations. On a constaté des erreurs inexplicables dans certains cas, notamment dans les comparaisons de temps entre l'U.S. Naval Observatory à Washington et le National Bureau of Standards à Boulder, par l'intermédiaire des émissions de Loran-C; des fluctuations de 1 à 2 μ s des temps de propagation semblent exister.

Mr *Potts* donne des indications sur le système Loran-C. La première chaîne (East Coast) a été mise en service en 1957, pour les besoins de la navigation. Comme le taux de récurrence était un sous-multiple exact de la seconde, il est rapidement devenu évident que l'émission pouvait servir à la distribution du temps. Un premier travail a été accompli par le National Bureau of Standards et l'U.S. Naval Observatory, et une impulsion supplémentaire a été transmise chaque seconde en synchronisme avec l'horloge maîtresse de l'U.S. Naval Observatory. Durant les dernières années, trois nouvelles chaînes ont été synchronisées en permanence et une (Méditerranée) temporairement. On envisage de synchroniser les huit chaînes en service; sept de ces chaînes sont déjà pourvues d'horloges à césium. La diffusion précise du temps offre l'avantage de permettre des études, telles que celles de Mr Bonanomi et d'autres, sur la propagation et la conductivité (transport d'horloges et de récepteurs au voisinage des émetteurs pour vérifier les instants d'émission, mesures le long de trajets terrestres de conductivités différentes). L'expérience acquise après plus d'un demi-million d'heures de fonctionnement montre l'excellente qualité des étalons commerciaux à césium. Les spécifications des constructeurs sont très largement sous-estimées. La dispersion des fréquences des étalons, tels qu'ils sont fournis par les constructeurs et sans réglage, ne

dépasse pas 5×10^{-12} . Après réglages, elle reste de quelques 10^{-13} , à long terme.

Mr *Terrien* demande si l'on observe un écart systématique entre la fréquence des étalons primaires des laboratoires et la fréquence moyenne d'un grand nombre d'étalons commerciaux. Mr *Winkler* répond que, d'après les horloges de l'U.S. Naval Observatory, cette différence n'excède pas 3×10^{-13} . Cela est confirmé par l'échelle du B.I.H. qui comprend d'autres groupements d'étalons commerciaux.

Mr *Barnes* ne croit pas que l'uniformité d'une échelle de temps et l'exactitude de son unité soient réellement incompatibles, et il estime qu'on peut facilement trouver un compromis. Des indications sur ce point se trouvent dans un rapport de l'U.S. Naval Observatory distribué juste avant la séance par Mr *Winkler* (voir le résumé à l'Annexe S 7).

Dans le calcul de l'échelle de temps atomique de l'U.S. Naval Observatory, par moyenne des indications d'horloges, une pondération par horloge avait été utilisée jusqu'à il y a deux ans. Cette pondération a été abandonnée pour deux raisons: d'une part, elle attribuait un rôle trop important à un petit nombre d'horloges, diminuant ainsi l'intérêt de la moyenne, d'autre part, elle reposait sur les propriétés passées des horloges. A présent, le calcul repose sur la comparaison de 25 à 30 horloges à césium commerciales, maintenues aussi indépendantes que possible. Pour cela, on mesure les variations de phases relatives, à la fréquence de 1 MHz, entre toutes les horloges et deux ou trois d'entre elles prises comme références. Les mesures, portant sur des intervalles consécutifs de trois heures, sont analysées tous les cinq jours. Lorsqu'une horloge montre une variation de fréquence significative par rapport à la fréquence moyenne de tout l'ensemble, elle est éliminée et le calcul est repris sans elle. Ces éliminations peuvent être répétées par étapes successives. Le nombre d'éliminations est, en général, d'un ou deux et il reste, en permanence, environ 16 horloges dont la moyenne des indications non pondérées fournit l'échelle de temps. Une nouvelle horloge n'est introduite dans le système qu'après une période de deux mois pendant lesquels sa correction de fréquence, par rapport à l'ensemble, est déterminée. Ces précautions étant prises, il ne semble pas qu'une dérive en fréquence de la moyenne puisse dépasser 1×10^{-13} .

A la demande de Mr *Guinot*, Mr *Winkler* précise que les horloges sont à présent conservées dans le système avec des corrections de fréquence dont la moyenne n'est pas nulle; il en résulte que l'addition successive de nouveaux étalons peut conduire à une dérive indéfinie de la durée de l'unité de l'échelle moyenne par rapport à la seconde. Mais le grand nombre d'étalons utilisés permettrait de remédier à cette situation en conservant nulle en permanence la correction moyenne de fréquence de l'ensemble des étalons.

En réponse à une question de Mr *Leschiutta*, Mr *Winkler* indique que les corrections de fréquence sont faites par le calcul; il y a intérêt à ne

jamais modifier une horloge (par opposition à un étalon de fréquence qui doit être réglé pour donner la fréquence la plus exacte).

Mr Barnes demande quel est le critère d'élimination. Mr *Winkler* répond qu'il est extrêmement facile de faire la distinction entre les erreurs accidentelles des fréquences et une perturbation dans le fonctionnement d'une horloge.

3. Définition d'une échelle de temps atomique international tenant compte, en particulier, des effets relativistes

D'après Mr *Becker*, il y a lieu de distinguer entre le concept d'un temps idéal et l'approximation avec laquelle il peut pratiquement être réalisé. Le temps idéal, appelé « temps terrestre » par exemple, doit être défini dans un système de référence gravitationnel; est-ce la surface du géoïde ou un point spécifique de la Terre qui convient le mieux ? Il faut cependant éviter d'introduire implicitement dans la définition une théorie de la relativité; à cet égard, le choix d'un point de la Terre comme lieu de référence est plus satisfaisant mais, dans la pratique, il impose des corrections plus compliquées à l'utilisateur, puisqu'il faut connaître les potentiels de gravitation en deux points. L'approximation réalisée en pratique pourra s'appeler le « temps international ».

Mr *Winkler* estime qu'il n'y a pas lieu d'introduire de nouvelles notations et propose de conserver l'appellation de « Temps Atomique International » à l'échelle de temps réalisée. La Conférence Générale des Poids et Mesures a déjà défini la seconde; il importe que nous ne donnions pas une nouvelle définition par l'intermédiaire de la définition d'une échelle de temps. C'est donc la définition pratique de l'échelle de temps qui nous concerne. Les points à examiner sont les suivants : 1^o la conduite du calcul (pondération en particulier); 2^o les changements de fréquence destinés à maintenir l'exactitude de l'unité de l'échelle, par exemple à $\pm 1 \times 10^{-12}$, par des changements aussi peu fréquents que possible (tous les 5 ans); 3^o le lieu de référence (le pôle, sur le géoïde, conviendrait car on supprime ainsi les effets de la rotation terrestre); 4^o les méthodes de dissémination du temps atomique international.

Le *Président* propose que Mr Guinot forme une commission chargée de rédiger la définition du temps atomique international. Il faut que la discussion qui va suivre éclaire suffisamment cette commission pour qu'elle puisse travailler efficacement.

La discussion porte sur la référence spatiale du temps atomique international. Aucune Union n'a encore exprimé une opinion sur ce problème. Le désir de ne pas faire appel à une théorie et celui de permettre les développements au niveau de précision le plus élevé font préférer à la plupart des participants un point de référence spécifié. Mr *Kovalevsky*, en particulier, attire l'attention sur les insuffisances de la définition du géoïde.

Selon Mr *Smith*, ces difficultés peuvent être évitées si l'on se borne à définir pratiquement l'échelle de temps.

Les problèmes soulevés par la pondération ne peuvent pas être traités dans le détail, pour le moment, estime Mr *Winkler*. On ne peut que recommander d'en poursuivre l'étude. Il faut, en particulier, décider de l'usage qu'on fera des étalons isolés.

En ce qui concerne les problèmes de l'exactitude et de l'uniformité du temps atomique international, MM. *Becker* et *Winkler* estiment qu'il faut continuer à opérer comme à présent, c'est-à-dire maintenir aussi constante que possible la durée de l'unité de l'échelle. Cette durée doit être comparée à la seconde fournie par les étalons primaires et ajustée à la seconde par sauts, si c'est nécessaire. Mr *Barnes* pense qu'un ajustement progressif de cette durée est possible, car les effets sont si petits que cet ajustement ne se sépare pas des dérives qu'on peut attendre des étalons commerciaux. La préférence des participants va cependant au maintien du plus haut degré possible d'uniformité. Pour le maintien de l'exactitude, il importe d'encourager les laboratoires à continuer les recherches sur les étalons primaires et à communiquer leurs résultats au B.I.H.

La commission, animée par Mr *Guinot*, comprenait MM. *Barnes*, *Becker*, *Bonanomi*, *Henderson*, *Kovalevsky*, *Smith*, *Steele*, *Terrien*, *Winkler*. Elle s'est réunie après la séance de l'après-midi du jeudi 18 juin et a préparé un texte contenant une définition et des recommandations. La définition de l'échelle de temps atomique international est essentiellement pratique. Les recommandations donnent au B.I.H. les indications nécessaires comme base de son travail. La commission a discuté un problème important qui n'avait pas été évoqué auparavant. En effet, Mr *Becker* souhaite que le C.C.D.S. propose une définition du temps qui soit légalement utilisée. D'après lui, l'écart entre le temps universel et le temps qui sera prochainement diffusé par les signaux horaires (temps atomique à sauts d'une seconde destinés à suivre approximativement le TU) devient trop important pour qu'on puisse continuer à affirmer que le TU est la base des temps légaux. Il faut donc que le C.C.D.S. définisse l'échelle de temps atomique à sauts. Cette opinion n'est pas suivie par la majorité des membres de la commission et l'on a préparé seulement la définition du temps atomique pur, c'est-à-dire sans décalage de fréquence ni sauts de temps, qui devra servir de base aux systèmes de coordination de la diffusion du temps. Ce choix a été entériné par l'ensemble des membres du Comité Consultatif (voir 4).

Le texte de la définition et des recommandations établi par la commission fait l'objet de discussions et d'améliorations. Mr *Terrien* précise que seule la définition sera soumise à la Conférence Générale des Poids et Mesures, en 1971. Mr *Becker* propose d'inclure dans la définition les recommandations qui traitent de la durée de l'unité de l'échelle et de son origine; cela n'est pas accepté, car c'est à dessein que l'on a omis toute

référence au mode de réalisation de l'échelle qui aurait impliqué une référence à une théorie de la relativité. Mr *Egidi* propose de définir un décompte décimal des secondes destiné à remplacer le compte par minutes, heures et jours; Mr *Winkler*, qui utilise déjà un tel décompte, souhaite qu'on attire l'attention sur ce problème; Mr *Smith* pense que cela pourrait éviter l'apparition de nouvelles unités comme la fraction décimale du jour; Mr *Becker* demande une définition formelle des multiples de la seconde : minute, heure, ... A cette dernière demande, Mr *Terrien* rappelle que ces unités ont déjà été acceptées par le Comité Consultatif des Unités, à cause de la législation pratique (km/h, kWh, etc.). Le *Président* propose que le décompte décimal des secondes soit aussi examiné par le Comité Consultatif des Unités.

4. Maintien et diffusion de l'échelle de temps atomique international.
Tâches respectives du B.I.H. et du B.I.P.M.
Problèmes financiers

Le *Président* estime qu'il est impossible que le Bureau International des Poids et Mesures gère un laboratoire indépendant pour établir l'échelle de temps atomique international : le coût en serait trop élevé; il est, d'autre part, admis par l'ensemble des membres du Comité Consultatif qu'il y a avantage, au moins pour les quelques prochaines années, à ce que le même organisme s'occupe du temps astronomique et du temps atomique. Le B.I.H. devrait donc établir l'échelle de temps atomique international. Il faut pour cela qu'il puisse compter sur l'appui des laboratoires qui collaborent avec lui et sur la continuation des services rendus par les États-Unis. Bien que le B.I.H. ait essentiellement le rôle d'un bureau de calculs, il est nécessaire que son personnel soit familiarisé avec les problèmes expérimentaux et qu'il dispose pour cela d'un laboratoire horaire.

En dehors de l'allocation annuelle de la Fédération des Services permanents d'Astronomie et de Géophysique (F.A.G.S.), qui couvre seulement environ 1/20 de ses frais, le B.I.H. fonctionne grâce à la collaboration bénévole des laboratoires et à l'appui de l'Observatoire de Paris. Mr *Pearson* assure de la coopération des États-Unis pour l'emploi du Loran-C : ce système doit continuer à fonctionner pendant 5 à 10 ans au moins et l'on continuera à l'améliorer pour la distribution du temps. Mr *Winkler* mentionne que la coopération entre l'U.S. Naval Observatory et l'Observatoire de Paris, aussi bien pour l'astronomie que pour le temps atomique, doit continuer et que les transports d'horloge et les prêts d'équipement seront maintenus. Enfin, Mr *Terrien*, après une conversation personnelle avec le directeur de l'Observatoire de Paris, assure que cet Observatoire est disposé à continuer ses efforts en faveur du B.I.H.; les crédits de l'Observatoire suivent cependant les décisions du Gouvernement français et peuvent être réduits.

Mr *Guinot* serait désireux d'obtenir, pour les quelques années à venir, une allocation d'environ 12 000 dollars U.S., qui lui permettrait de payer un technicien hautement qualifié et d'assurer la publication et l'envoi de circulaires. Grâce à l'aide technique proposée par les laboratoires, il lui serait ainsi possible de garantir la continuité du travail sur le temps atomique, quels que soient les problèmes financiers de l'Observatoire de Paris.

Cette somme, remarque Mr *Henderson*, est très modique, puisqu'elle ne couvrirait que le dixième des frais de fonctionnement du B.I.H. Le *Président* propose de demander à la Conférence Générale des Poids et Mesures que cette allocation soit versée jusqu'en 1975. D'après des conversations privées qu'il a eues, certains grands pays accepteraient que cette somme soit fournie par une augmentation de leur contribution au Bureau International des Poids et Mesures. Mr *Terrien* propose de demander aux membres du Comité International des Poids et Mesures de consulter leurs autorités nationales afin de savoir si elles pourraient contribuer à cette allocation. Mr *Vlassov* déclare que l'U.R.S.S. reconnaît que l'échelle de temps atomique établie par le B.I.H. est utile pour la comparaison et l'étude des échelles nationales; l'U.R.S.S. estime donc nécessaire de poursuivre l'établissement de cette échelle et normal que des crédits supplémentaires y soient affectés par la Conférence Générale. L'étalon de l'U.R.S.S. reproduit la seconde du Système International à $\pm 2 \times 10^{-12}$ près. L'U.R.S.S. a l'intention d'opérer une synchronisation en temps et fréquence avec le temps atomique international. Outre les réceptions de fréquences étalons, un transport d'horloge serait nécessaire.

Les liaisons entre le Comité International des Poids et Mesures et le B.I.H. doivent pouvoir être assurées de façon satisfaisante par l'intermédiaire du comité de direction du B.I.H. Il faudrait cependant que le C.I.P.M. ait dans ce comité un ou deux représentants, comme l'U.A.I. ou l'U.G.G.I., et non pas un observateur comme c'est le cas à présent. Les statuts de la F.A.G.S. ne sont pas explicites sur ce point, mais ils semblent le permettre. Ce problème pourra être évoqué lors de la prochaine réunion du Conseil de la F.A.G.S. (septembre 1970). Les représentants du C.I.P.M. pourraient être le directeur ou le sous-directeur du B.I.P.M. et un membre du C.I.P.M. Il importe que les relations du C.I.P.M. et du B.I.H. soient bien claires et qu'elles ne reposent pas seulement sur le bon vouloir des personnes.

La conduite à tenir à l'égard du C.C.I.R. et des Unions scientifiques qui se sont occupées du temps jusqu'à présent: U.A.I., U.R.S.I., fait l'objet d'une importante discussion. Selon Mr *Becker*, le C.I.P.M. devrait prendre complètement la charge des échelles de temps atomique, qu'elles soient pures ou coordonnées avec le TU par un système de compromis. Pour cela, il faudrait que le C.C.D.S. étende ouvertement sa compétence ou suggère au C.I.P.M. la formation d'un nouveau Comité Consultatif, et

que les utilisateurs soient représentés dans l'un ou l'autre de ces Comités. On considère en effet, en Allemagne, qu'il est fâcheux que le C.C.I.R. définisse les échelles de temps en usage. Dans leur ensemble, les membres du C.C.D.S. pensent qu'il faut agir avec prudence et tenir compte des travaux entrepris par les Unions scientifiques. C'est cette prudence qui a conduit le C.I.P.M., lors de sa session de 1969, à conserver le nom de C.C.D.S. sans référence aux échelles de temps. Il faut plus particulièrement tenir compte de l'action du C.C.I.R. en cours; cette organisation bénéficie d'une bonne représentation des utilisateurs de temps et nous ne devons pas la gêner. Le temps atomique à sauts, dont le C.C.I.R. recommande l'emploi à partir de janvier 1972, ne doit donc pas être considéré par le C.C.D.S.

En résumé, la position suivante est adoptée. Pour une période intermédiaire, on laisse se poursuivre les actions en cours; la définition d'une échelle de temps atomique international par le C.I.P.M. répond au désir de l'U.R.S.I. et du C.C.I.R. et peut servir de base à leurs travaux. Nous continuerons donc à travailler en collaboration avec les organismes internationaux concernés. Durant cette période, nous chercherons à clarifier les relations entre Unions.

Mr *Henderson* estime qu'en raison de son rôle important, le C.C.I.R. devrait avoir également un représentant (et non un observateur, comme c'est le cas actuellement) au sein du comité de direction du B.I.H.

Il est finalement convenu que les définitions et recommandations qui viennent d'être adoptées seront envoyées à l'U.A.I. afin qu'elles puissent être considérées lors de son Assemblée Générale d'août 1970; ce document, qui n'aura pas encore reçu l'approbation du C.I.P.M., sera présenté comme provisoire.

5. Questions soulevées par l'existence conjointe d'échelles astronomiques de temps

Ces questions sont essentiellement celles que pose le besoin de diffuser le TU. En conséquence de la position qui vient d'être prise (*voir 4*), le C.C.D.S. n'a pas à s'en occuper pour le moment.

6. Questions diverses

Mr *Winkler*, à la demande de Mr *Henderson*, expose la situation actuelle du système de prévention des collisions aériennes (CAS) fondé sur le synchronisme en temps et fréquence d'horloges embarquées. Les expériences ont montré que le CAS était très coûteux; il est apparu, d'autre part, difficile d'éviter que les pilotes d'avions reçoivent des ordres contradictoires de la part du CAS et des services de contrôle à terre. Il en résulte qu'il n'y a pas de programme pour le développement de ce système

dans l'immédiat et qu'il est peu probable qu'il soit adopté dans le futur. D'autres systèmes n'exigeant pas le synchronisme d'horloges sont à l'étude.

Mr *Guinol* remercie les membres du C.C.D.S. pour leurs marques de confiance concernant les travaux du B.I.H. et pour la contribution permanente apportée par les directeurs de laboratoires.

*
* *

Après avoir remercié les membres du Comité Consultatif pour leur travail, le Président clôt la session le 19 juin à 16 h 30 (1).

(24 juin 1970)

Recommandations (2)
du Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde
présentées
au Comité International des Poids et Mesures

Proposition d'adoption d'une échelle de Temps Atomique International

RECOMMANDATION S 1 (1970)

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

CONSIDÉRANT

1° *Le désir général de synchroniser ou de coordonner l'ensemble des émissions de signaux horaires diffusés dans le monde ;*

2° *le besoin d'une référence de temps uniforme pour l'étude de la dynamique des systèmes et, en particulier, pour l'étude des mouvements des corps célestes naturels et artificiels ;*

(1) *Note du B.I.P.M.* — Les représentants des laboratoires japonais ont fait savoir, par lettre du 12 août 1970, leur accord général avec les vues exprimées par le C.C.D.S. En particulier, ils soulignent l'importance de la Recommandation S 3 et des règles pour la mise en pratique du Temps Atomique International, et ils approuvent les propositions d'aide financière au B.I.H.

(2) Les numéros initialement attribués à ces recommandations ont été changés après l'examen par les membres du C.C.D.S. du projet du rapport de la session :

— La Recommandation S 1 correspond à l'ancienne Recommandation S 1 amputée du considérant 4°; ce paragraphe est reporté en remarque finale de l'ensemble des Recommandations adoptées.

— La Recommandation S 2 est inchangée.

— La Recommandation S 3 correspond à l'ancienne Recommandation S 4.

— La Recommandation S 4 correspond à l'ancienne Recommandation S 5.

— Les règles pour la mise en pratique du Temps Atomique International correspondent à l'ancienne Recommandation S 3.

Ces Recommandations ont été approuvées par le Comité International des Poids et Mesures à sa 59^e session (octobre 1970).

3° l'utilité d'une échelle de temps aussi uniforme que possible pour servir de base à la comparaison des étalons de fréquence opérant en des lieux et à des instants différents ;

RECOMMANDE l'adoption d'une échelle de Temps Atomique International.

Proposition de définition du Temps Atomique International

RECOMMANDATION S 2 (1970)

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde propose de définir le Temps Atomique International (TAI) comme suit :

« *Le Temps Atomique International est la coordonnée de repérage temporel établie par le Bureau International de l'Heure sur la base des indications d'horloges atomiques fonctionnant dans divers établissements conformément à la définition de la seconde, unité de temps du Système International d'Unités* ».

Poursuite des recherches sur les étalons atomiques de fréquence et sur les méthodes d'évaluation du Temps Atomique International

RECOMMANDATION S 3 (1970)

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

CONSIDÉRANT que le nombre des étalons primaires de fréquence et leur exactitude sont à peine suffisants pour contrôler le maintien d'une durée constante de l'intervalle unitaire de l'échelle de Temps Atomique International,

RECOMMANDE aux organismes compétents d'entreprendre ou de poursuivre activement les recherches en vue d'une réalisation plus exacte de la seconde du Système International d'Unités.

RECOMMANDATION S 4 (1970)

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde,

CONSIDÉRANT que l'expérience acquise n'est pas suffisante pour que l'on puisse dès maintenant fixer les règles de pondération des indications des horloges atomiques contribuant à l'établissement de l'échelle de Temps Atomique International,

RECOMMANDE que cette question soit étudiée activement.

MISE EN PRATIQUE DU TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde propose les règles suivantes pour la mise en pratique de l'échelle de Temps Atomique International pendant les quelques années à venir :

1° *La durée de l'intervalle unitaire de l'échelle de Temps Atomique International est déterminée par le Bureau International de l'Heure (B.I.H.) de*

façon qu'elle soit en accord étroit avec la durée de la seconde du Système International d'Unités rapportée à un point fixe de la Terre au niveau de la mer.

2° La durée de l'intervalle unitaire de l'échelle de Temps Atomique International est maintenue aussi constante que possible. Elle est fréquemment comparée à la durée de la seconde du Système International d'Unités telle qu'elle est obtenue à l'aide des étalons primaires de fréquence de divers établissements. Les résultats de ces comparaisons sont portés à la connaissance du B.I.H.

3° La durée de l'intervalle unitaire de l'échelle de Temps Atomique International n'est changée intentionnellement que si elle diffère d'une façon significative de la durée de la seconde spécifiée en 1°. Ces ajustements n'auront lieu qu'à des dates convenues à l'avance et annoncées par le B.I.H.

4° L'origine de l'échelle de Temps Atomique International est définie conformément aux recommandations de l'Union Astronomique Internationale (XIII^e Assemblée Générale, Prague, 1967), c'est-à-dire que cette échelle s'accorde approximativement avec le TU2 à 0 heure le 1^{er} janvier 1958.

5° Le procédé par lequel le Temps Atomique International est actuellement porté à la connaissance des usagers, c'est-à-dire par la publication mensuelle des écarts des échelles locales, est considéré comme satisfaisant.

Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde note que les Recommandations et propositions ci-dessus vont dans le sens des demandes approuvées par le Comité Consultatif International des Radiocommunications (C.C.I.R.) à sa 12^e Assemblée Plénière (New Delhi, 1970) et par l'Union Radioscientifique Internationale (U.R.S.I.) à sa 16^e Assemblée Générale (Ottawa, 1969, Résolution 1.4).

ANNEXE S 1

Documents présentés à la 5^e session du C.C.D.S.

Document

N°

- 70-4 Consultation préalable par correspondance
Ce document, préparé par le B.I.P.M. et adressé aux membres du C.C.D.S. le 26 janvier 1970, contient un certain nombre de questions auxquelles les membres étaient priés de répondre avant la session. Ces questions, ainsi que les réponses reçues, sont données à l'Annexe S 2.
- 70-5 B.I.H. - Travaux à propos du temps atomique, par B. Guinot et F. Laclare.
Ce document est un extrait (pp. 13-29 ; 61-67) du Rapport Annuel du Bureau International de l'Heure pour 1969.
- 70-6 Commission Nationale de l'Heure (France). - Réponse au document N° 70-4.
- 70-7 N.B.S. - Comments on an international atomic time scale, by J.A. Barnes (Voir Annexe S 4).
Responses to document N° 70-4.

Document

N°

70-8 L.S.R.H. (Suisse).- Réponse au document N° 70-4.

En annexe à cette réponse étaient joints les textes des communications A 3 et A 8 présentées au "Colloque International de Chronométrie", Paris, 16-19 septembre 1969 :

Résonateur à césium de conception nouvelle, par P. Kartaschoff et P.-E. Debély.

Les possibilités d'amélioration de la stabilité à court terme et de l'exactitude des résonateurs à jet atomique de césium sont discutées. Une conception nouvelle du système de déflexion utilisant un aimant dipolaire à double entrefer en tant qu'aimant B est décrite. L'intensité du signal de résonance observé permet de prévoir une stabilité de 2×10^{-12} pour une durée de mesure de 1 s.

Résultats nouveaux obtenus avec les masers à hydrogène H 2 et H 3 du L.S.R.H., par Ch. Menoud et J. Racine.

Le procédé de fabrication des revêtements FEP-120 par couches multiples utilisé au L.S.R.H. est décrit. Le coefficient de correction de la paroi K est de 0,515 \pm 0,028 Hz·cm et la fréquence de l'hydrogène mesurée est de 1 420 405 751,778 2 \pm 0,003 6 Hz.

70-9 N.R.L.M. et R.R.L. (Japon).- Views on document N° 70-4.

70-10 N.R.C. (Canada).- Comments concerning document
et N° 70-4.

70-24 Additional proposals and comments concerning questions 4a and 4b of document N° 70-4.

70-11 P.T.B. (Allemagne).- Answers to the questions listed in the document N° 70-4.

En annexe à ces réponses était jointe la traduction anglaise du paragraphe 9 (Proposal for the realization of the international atomic time scale) extrait de l'article de G. Becker : Zum Problem künftiger Zeitskalen, publié dans PTB-Mitteilungen, 79, n° 6, 1969, pp. 441-446.

Document

N°

- 70-12 B.I.H. et B.I.P.M.- Réponse au questionnaire du document N° 70-4.
- 70-13 B.I.H.- Commentaires sur l'utilisation du temps atomique, par B. Guinot (Voir Annexe S 5).
- 70-14 P.T.B. (Allemagne).- Proposition d'une activité dans le domaine des échelles de temps pour la Conférence Générale et le Comité International des Poids et Mesures, par G. Becker.
Publié dans Procès-Verbaux C.I.P.M., 37, 1969, pp. 118-121.
- 70-15 Commentaires de J. Bonanomi (Observatoire de Neuchâtel, Suisse) sur le document N° 70-4.
- 70-16 D.A.M.W. (Allemagne).- Rapport au B.I.P.M. pour la 5^e session du C.C.D.S., par M. Kalau (Voir Annexe S 3).
- 70-17 N.P.L. (Royaume-Uni).- Views on the questions posed in document N° 70-4.
- 70-18 Answers from A. Orte to the questions contained in document N° 70-4.
- 70-19 Sur la définition d'un "temps coordonnée" terrestre, par O. Costa de Beauregard (Voir Annexe S 8).
- 70-20 Bureau des Longitudes (France).- Réponse au questionnaire du document N° 70-4.
- 70-22 P.T.B. (Allemagne).- Some principles concerning codes expressing the time difference between UT and SAT, by G. Becker (Voir Annexe S 9).

Document

N°

- 70-23 I.E.N. (Italie).- Réponses aux questions du document N° 70-4.
- 70-25 Royal Greenwich Observatory (Royaume-Uni).- Comments on document N° 70-4.
- 70-26 U.S. Coast Guard.- Responses to the questions in document N° 70-4.
- 70-27 U.S. Naval Observatory.- Preliminary comments concerning the questions in document N° 70-4 (Voir Annexe S 6).
The U.S. Naval Observatory clock time reference and the performance of a sample of atomic clocks, by G.M.R. Winkler, R.G. Hall and D.B. Percival (Voir le résumé à l'Annexe S 7).
- 70-28 I.E.N. (Italie).- The true meaning of the word "time", by C. Egidi and S. Leschiutta.
Publié dans Alta Frequenza, 1970.
Émetteur étalon IBF : Programme des émissions expérimentales (16.6.1970), 1 page.
-

ANNEXE S 2

Consultation préalable par correspondance

Cette consultation préalable a été préparée par le Bureau International des Poids et Mesures afin de rendre plus efficaces les discussions au cours de la 5^e session du C.C.D.S. en vue des décisions à prendre. Le questionnaire, adressé aux membres du C.C.D.S. le 26 janvier 1970, concernait les sujets suivants :

- Étalons de fréquence (à césium et autres) : performances actuelles et progrès (Questions 1a, 1b, 1c).
- Échelle de temps atomique ; importance de la définition d'une échelle de temps atomique internationale ; effets relativistes (Questions 2a, 2b, 3a, 3b).
- Rôle du Comité International et du Bureau International des Poids et Mesures, et arrangements avec le Bureau International de l'Heure en relation avec l'établissement, le maintien et la diffusion du temps atomique international (Questions 4a, 4b).
- Problèmes que pose la coexistence du TA, du TU et du TUC utilisé pour la diffusion de plusieurs signaux horaires (Question 5).

Les réponses reçues, classées par question, sont données ci-après. Celles du Deutsches Amt für Messwesen und Warenprüfung (Berlin) et de l'U.S. Naval Observatory (Washington) font l'objet des Annexes S3 et S6.

QUESTION 1a

Quelles sont les performances actuelles des étalons de fréquence à césium dans votre laboratoire ou dans votre pays ?

COMMISSION NATIONALE DE L'HEURE (C.N.H.), Paris

Les cinq étalons utilisés par la C.N.H. pour former l'échelle nationale de temps atomique sont tous du modèle Hewlett-Packard 506 1A. Exactitude : $\pm 2 \times 10^{-12}$; stabilité à très long terme : quelques 10^{-13} . Les étalons expérimentaux construits dans les laboratoires de recherche n'entrent pas, pour le moment, dans la formation de l'échelle nationale.

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES (N.R.C.), Ottawa

Les performances actuelles de l'étalon primaire de fréquence à jet de césium du N.R.C. (Cs III) sont décrites dans deux publications^(1,2), ainsi que sur les figures 1 et 2 qui donnent pour 1969 les comparaisons des échelles de temps NBS, USNO, RGO, ON, F, PTB et NRC effectuées au moyen du Loran-C. On estime que la limite d'exactitude de Cs III est environ $1,5 \times 10^{-12}$. Les comparaisons avec d'autres étalons ou groupes d'étalons qui donnent un accord de quelques 10^{-13} font penser que cette estimation de l'exactitude est vraisemblablement prudente. On a poursuivi l'amélioration de l'électronique et du servomécanisme de Cs III et obtenu ainsi une meilleure stabilité à court terme. Depuis la dernière publication, on n'a apporté aucun changement important dans la construction matérielle et

(1) Mungall (A.G.), Bailey (R.), Daams (H.) and Morris (D.), A re-evaluation of the NRC long cesium beam frequency standard. Metrologia, 4, n° 4, 1968, pp. 165-168.

(2) Mungall (A.G.), Daams (H.) and Bailey (R.), Note on atomic time keeping at the National Research Council. Metrologia, 5, n° 3, 1969, pp. 73-76.

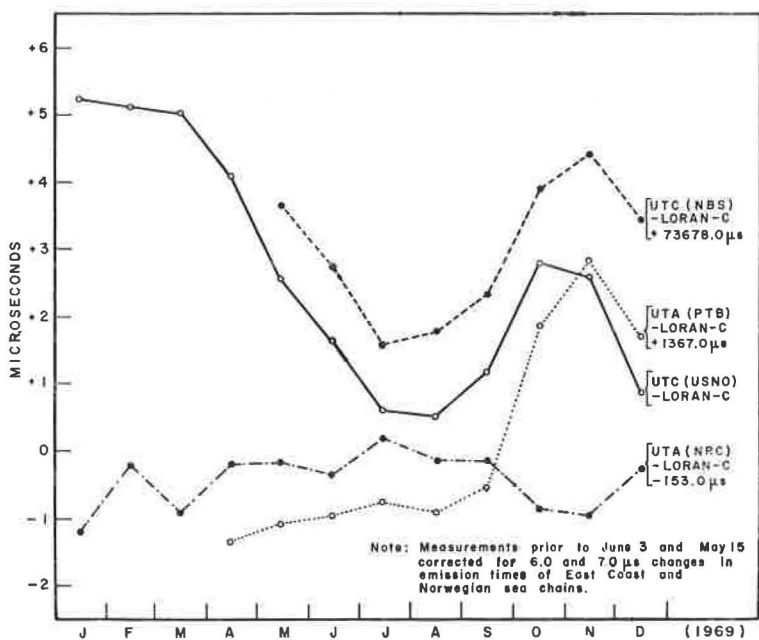


Fig. 1.- Moyennes mensuelles des mesures par Loran-C (East Coast chain) pour l'U.S.N.O., le N.B.S., la P.T.B. et le N.R.C. pour 1969.

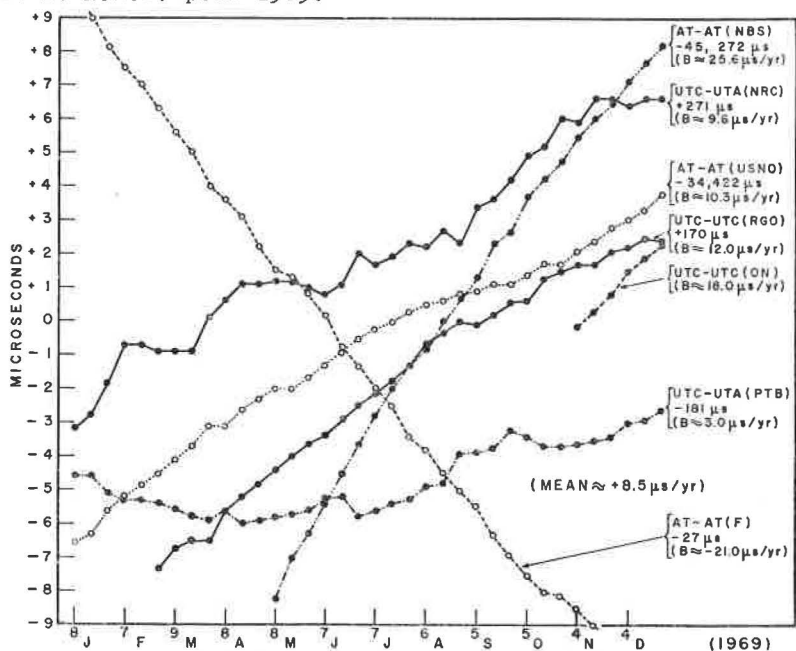


Fig. 2.- Différences de temps entre l'échelle moyenne du B.I.H. et les échelles qui la constituent, telles qu'elles sont données dans le Rapport du B.I.H. pour 1969.

l'on n'en envisage aucun ; en fait, nous concentrons actuellement nos travaux de recherche sur deux nouveaux étalons Cs IV et Cs V.

Nous avons aussi utilisé au N.R.C. un étalon de fréquence à jet de césium de type commercial Hewlett-Packard comme étalon secondaire à fonctionnement continu ; sa fréquence est comparée à Cs III au moins deux fois par semaine. Ces étalonnages ont révélé des variations systématiques de fréquence dans l'horloge H-P, atteignant jusqu'à 2×10^{-12} sur plusieurs jours, semaines ou mois. De telles variations, qui ont été observées sur d'autres horloges du même genre, limitent les possibilités d'exactitude de ces horloges pour la conservation du temps. Il est donc souhaitable d'avoir un étalon primaire fonctionnant de façon continue ; les efforts de recherche portent actuellement sur un étalon primaire à long jet, dont l'exactitude soit supérieure à celle de Cs III et capable de fonctionner de façon continue pendant des mois ou des années.

ISTITUTO ELETTROTECNICO NAZIONALE (I.E.N.), Turin

L'étalon de fréquence (IEN 2) est constitué par un résonateur à césium de type commercial d'une longueur d'interaction de 25 cm⁽³⁾ ; la partie radioélectrique de l'étalon est dans sa presque totalité celle de l'étalon IEN 1.

La précision estimée par rapport à la définition est 5×10^{-12} environ. Le système est mis en service une fois par semaine pour étalonner un appareil commercial (Hewlett-Packard 5061 A) qui est en service continu (IEN 3). La fréquence de cet étalon est dans les limites de $\pm 3 \times 10^{-12}$ par rapport à IEN 2.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS (N.B.S.), Boulder

L'étalon de fréquence d'usage du N.B.S. (NBS-III) a une exactitude possible de 5×10^{-13} (1σ) si l'on tient

(3) Leschiutta (S.), Esperienze con un risuonatore al cesio di tipo commerciale. Alta Frequenza, XXXVII, 1968, pp. 916-922.

compte en détail des conditions de fonctionnement. Cette exactitude n'est pas atteinte en service de routine⁽⁴⁾.

La figure 3 permet une comparaison des stabilités de fréquence d'un certain nombre d'appareils.

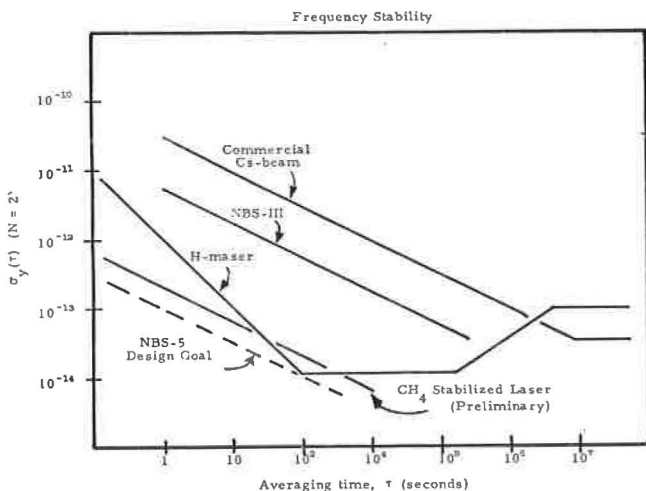


Fig. 3

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (N.P.L.), Teddington

Dans l'étalon primaire à césium à long jet (NPL II) l'effet de la différence de phase de la cavité a été éliminé en mettant une source et un détecteur à chaque extrémité de la chambre. L'exactitude de l'étalon continue à être limitée à 5×10^{-12} par des irrégularités dans le champ C.

Deux étalons à césium Hewlett-Packard (H-P) sont utilisés pour fournir des échelles locales de TA(NPL) et TUC(NPL) ; leur concordance sur de longues périodes, déterminée au moyen de comparaisons d'horloges voyageuses, est de quelques 10^{-13} . Un groupe de trois étalons à césium H-P fonctionne au Royal Greenwich Observatory et a montré une uniformité comparable.

(4) Glaze (D.J.), Improvements in atomic cesium beam frequency standards at the N.B.S. (à paraître).

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY (N.R.L.M.)
et RADIO RESEARCH LABORATORIES (R.R.L.), Tokyo

Sept oscillateurs à césium (Hewlett-Packard) sont en service : quatre aux R.R.L., deux au Tokyo Astronomical Observatory et un à l'International Latitude Observatory de Mizusawa.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (P.T.B.), Braunschweig

Il existe à la P.T.B. un résonateur à jet de césium (modèle de laboratoire, désigné CS 1) en service depuis le printemps 1969 comme étalon primaire de temps et de fréquence. L'incertitude relative intrinsèque ("exactitude") a été évaluée à $4,5 \times 10^{-13}$; elle est principalement due à l'incertitude sur l'effet Doppler du second ordre.

L'étalon CS 1 qui n'est pas conçu pour être employé de façon continue est caractérisé par l'utilisation d'aimants hexapolaires, les champs magnétiques étant parallèles à la direction du jet, et par une méthode qui permet de supprimer une différence de phase entre les deux champs de fréquences radio au moyen de la modulation de largeur de raie. De plus, il est possible de renverser le jet. Le "facteur de mérite" (Lacey et al., 1966) de CS 1 est environ 30 en fonctionnement "flop out". Des détails sur l'appareil ont été publiés (5, 6, 7).

Il y a à l'heure actuelle à la P.T.B. en service continu 3 horloges atomiques Hewlett-Packard à jet de

(5) Becker (G.), Fischer (B.), Kramer (G.), und Müller (E.K.), Neuentwicklung einer Cäsiumstrahlapparatur als primäres Zeit- und Frequenznormal an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. PTB-Mitt., 79, 1969, pp. 77-80.

(6) Becker (G.) et al., Neukonstruktion eines Cäsiumstrahl-Zeitnormals an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. In "Colloque International de Chronométrie", Paris 1969, Série A (A1).

(7) Becker (G.) et al., Diskussion der inneren Unsicherheit des neuen Cäsiumstrahl-Zeitnormals der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. In "Colloque International de Chronométrie", Paris 1969, Série A (A2).

césium. Une horloge du même type est à la disposition du Deutsches Hydrographisches Institut, à Hambourg, et une autre (qui ne fonctionne pas de façon continue) au Fernmeldetechnisches Zentralamt, à Darmstadt.

A la P.T.B., deux tubes ont dû être changés, l'un après 19 mois, l'autre après 24 mois d'utilisation. Au moins six mois avant que les pannes ne se produisent, les fréquences avaient commencé à diminuer jusqu'à $0,5 \times 10^{-12}$ et $1,5 \times 10^{-12}$ respectivement. Les fréquences des tubes étaient ou sont pour la plupart trop élevées par rapport à la fréquence de référence de TA (PTB) (qui est proche de celle de TA (BIH)), à savoir :

$$\begin{aligned} & - 0,9 \times 10^{-12} \\ & + 2,3 \\ & + 4,4 \\ & + 6,7 \end{aligned}$$

Après quelques semaines de mise sous tension et dans de bonnes conditions d'environnement, une bonne horloge de ce type ne voit sa fréquence moyenne changer que de quelques 10^{-13} au cours de la première année.

Tous les dix jours, les champs magnétiques des horloges sont contrôlés et corrigés si besoin est.

ROYAL GREENWICH OBSERVATORY (R.G.O.), Hailsham

Il y a trois étalons à césium Hewlett-Packard au R.G.O. ; un quatrième sera installé prochainement. La différence de fréquence entre les étalons employés n'a pas dépassé 7×10^{-13} , et les variations de fréquence sur plusieurs mois n'ont pas dépassé 4×10^{-13} .

U.S. COAST GUARD (U.S.C.G.), Washington

L'U.S.C.G. possède actuellement 57 étalons à césium Hewlett-Packard répartis au sein des systèmes de navigation Loran-C et Loran-A. La plupart de ces étalons sont installés aux stations Loran-C à travers tout l'hémisphère nord et fonctionnent de façon continue sur la fréquence TUC(USNO). Pour six chaînes, parmi les huit chaînes

Loran-C, la fréquence est maintenue à $\pm 2 \times 10^{-12}$ de sa valeur nominale et, en général, pour de longues durées elle est de quelques 10^{-13} de la fréquence décalée nominale. Du fait que les émissions de cinq chaînes sont synchronisées sur l'horloge pilote de l'U.S. Naval Observatory, on ajuste si nécessaire la phase des émissions pour maintenir les tolérances de synchronisation publiées. Sur la base de plus d'un demi-million d'heures de fonctionnement de l'étalon de fréquence à jet de césium Hewlett-Packard modèle 5061-A, la fiabilité s'est révélée excellente. La stabilité à long terme des étalons (sans correction et par rapport à l'horloge pilote de l'U.S.N.O.) a été remarquable dans certains cas (4×10^{-14} pour 90 jours, 7×10^{-14} pour 120 jours).

QUESTION 1b

Quels progrès sont en préparation sur les étalons de fréquence à césium ?

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES (N.R.C.), Ottawa

Les recherches en cours au N.R.C. sur les étalons à césium sont centrées sur deux appareils : Cs IV et Cs V. Cs IV est un étalon expérimental utilisant des aimants hexapolaires pour la sélection des états, un jet et un détecteur annulaires. Dans cet étalon, la source d'un second jet est placée au centre de chaque détecteur annulaire de telle sorte que l'on peut faire fonctionner les jets en sens contraire, alternativement ou simultanément. On a cherché, par traitement électronique des signaux de détection des deux jets, à éliminer les erreurs systématiques résultant des différences de phase de la cavité.

Des expériences ont montré que le fonctionnement simultané des deux jets est possible, mais qu'il se produit une certaine interaction entre la source et le détecteur voisin. Un problème plus sérieux est le courant rési-

duel élevé du détecteur, apparemment caractéristique de la grande surface du détecteur annulaire. Le niveau de bruit excessif qui en résulte a jusqu'ici empêché l'utilisation pratique de cet étalon.

Étant donné les difficultés expérimentales rencontrées avec Cs IV, on a conçu un nouvel étalon (Cs V) qui est en cours de construction. Cet étalon utilise le même genre de jet du type ruban et de sélecteurs d'états magnétiques dipolaires que ceux employés actuellement dans Cs III. On a prévu également la possibilité d'un fonctionnement alterné du jet dans les deux directions, ainsi que la possibilité de passer d'une direction à l'autre en cours de fonctionnement. Les ensembles four et détecteur ont été conçus de façon à minimiser leur interaction. Une telle possibilité d'avoir un jet dans les deux directions devrait permettre de déterminer l'erreur systématique provenant de la différence de phase de la cavité avec plus d'exactitude que ce que l'on peut obtenir en retournant la cavité. On a toutefois prévu de pouvoir retourner la cavité. Les autres facteurs dont on attend une amélioration de l'exactitude pour Cs V comprennent un meilleur blindage magnétique, une intensité plus grande du jet, et la possibilité de fonctionner avec une source et un détecteur en position axiale ou décentrée, réglable en cours de fonctionnement.

Le système à vide et le four à césium sont tous les deux conçus pour une durée de vie particulièrement longue, de façon à permettre le fonctionnement comme étalon de temps et non pas comme étalon de fréquence de référence, ce qui a été généralement le cas avec les précédents appareils à long jet. Cela devrait éliminer la dégradation d'exactitude inhérente à l'étalonnage de la marche d'oscillateurs secondaires en fonction d'un étalon primaire de fréquence.

ISTITUTO ELETTRONICO NAZIONALE (I.E.N.), Turin

L'I.E.N. travaille dans trois directions :

a) maintenir en service continu l'étalon IEN 2 ;

- b) améliorer, avec un asservissement numérique, la partie électronique de IEN 2 ;
- c) remplacer les aimants de déflexion, toujours bipolaires, de IEN 1.

LABORATOIRE SUISSE DE RECHERCHES HORLOGÈRES (L.S.R.H.),
Neuchâtel

Des résonateurs à césium de conception nouvelle sont en cours de développement au L.S.R.H. Ces résonateurs sont caractérisés par l'utilisation d'un aimant hexapolaire en tant que premier sélecteur d'état (aimant A) tandis que le deuxième sélecteur d'état (aimant B) est un aimant dipolaire à double entrefer. Cette solution a déjà été éprouvée dans nos expériences et permet d'obtenir un rapport signal/bruit considérablement amélioré par rapport à celui qui est obtenu au moyen de systèmes de déflexion classiques. L'espace d'interaction a également été réétudié. Une cavité du type Ramsey usinée avec haute précision doit permettre de réduire l'incertitude due au déphasage des champs oscillants à des valeurs inférieures à 10^{-13} . Un effort analogue a été entrepris pour obtenir un champ magnétique C hautement uniforme. L'incertitude totale limitant l'exactitude n'a pas encore pu être déterminée dans nos expériences, mais les données disponibles permettent d'espérer une exactitude meilleure que $\pm 1 \times 10^{-12}$ pour des résonateurs d'environ 80 cm de longueur et 15 cm de diamètre. Des informations plus détaillées ont été publiées⁽⁸⁾.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS (N.B.S.), Boulder

De nouveaux éléments de l'optique du jet et l'électronique sont en cours de construction pour l'étalon NBS-III ; l'appareil modifié sera appelé NBS-5. On pense qu'il permettra d'obtenir sur des intervalles d'une seconde

(8) Kartaschoff (P.) et Debély (P.E.), Résonateur à césium de conception nouvelle. In "Colloque International de Chronométrie", Paris 1969, Série A (A3).

une stabilité de la fréquence de 1×10^{-13} . On pense obtenir avec NBS-5 une exactitude de 1×10^{-13} (Glaze, réf. (4)).

Un second étalon à jet de césium (NBS-X4) est en construction avec une optique optimisée par ordinateur ; les essais finaux sont en cours. On pense que sa stabilité de fréquence pour des intervalles d'une seconde sera d'environ 1×10^{-12} et son exactitude d'environ 5×10^{-13} .

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (N.P.L.), Teddington

Des modifications seront prochainement apportées au système à vide de l'étalon NPL II pour lui permettre de fonctionner de façon encore plus continue et pour augmenter ainsi la sûreté du passage entre étalons primaire et secondaires. A la suite d'une étude des récents progrès dans les autres laboratoires, on est en train de travailler à la conception d'un étalon à césium amélioré qui, entre autres, permettra d'obtenir une plus grande uniformité du champ.

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY (N.R.L.M.) et RADIO RESEARCH LABORATORIES (R.R.L.), Tokyo

Un résonateur à césium du type de laboratoire (2,4 m) sera achevé au N.R.L.M. en 1970. Un autre oscilateur à césium (Hewlett-Packard) sera ajouté en 1970 dans les laboratoires suivants : I.L.O.M., N.R.L.M., R.R.L. et T.A.O.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (P.T.B.), Braunschweig

Des efforts seront faits pour réduire l'incertitude sur l'effet Doppler du second ordre de l'étalon primaire (CS 1) de la P.T.B. et pour accroître le facteur de mérite en introduisant le fonctionnement "flop-in".

Un deuxième étalon à jet de césium (CS 2) sera construit à la P.T.B. au début de 1970.

Le groupe des horloges secondaires (jets de césium) sera élargi.

QUESTION 1c

Quels résultats obtient-on avec d'autres étalons de fréquence (maser à hydrogène, étalon à jet de thallium, etc.) et quelles sont les études en cours sur ces étalons ?

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES (N.R.C.), Ottawa

Au N.R.C., l'étude d'étalons de fréquence autres que les appareils à jet de césium a été limitée aux masers à hydrogène. Deux masers à hydrogène ont été construits et les résultats obtenus ont été publiés⁽⁹⁾. On a déterminé la fréquence de la transition hyperfine de l'hydrogène par rapport à l'étalon Cs III ; la valeur obtenue, 1 420 405 751,776 3 Hz, est en accord étroit avec d'autres comparaisons semblables effectuées dans d'autres laboratoires. Cette détermination dépend d'un effet de paroi calculé plutôt que mesuré. Le travail en cours porte sur l'évaluation expérimentale de cet effet.

Au N.R.C., on a trouvé particulièrement utiles les deux masers à hydrogène comme générateurs de fréquence très stable essentielle pour évaluer à la fois la stabilité et l'exactitude des étalons à césium. Leur meilleure stabilité est environ 6×10^{-15} pour σ (2, T, τ), avec $T = \tau = 3000$ s.

À l'Université Laval à Québec, on a commencé à travailler sur un certain nombre d'étalons de fréquence autres que les appareils à césium, en particulier sur les masers à ^{87}Rb , ^{85}Rb et hydrogène, ainsi que sur les cellules à vapeur de ^{87}Rb .

Le maser à ^{85}Rb a été construit et on a fait des études de relaxation sur plusieurs gaz tampons différents. Il s'est révélé possible d'obtenir une oscillation à champ nul.

On construit des masers à ^{87}Rb et l'on étudiera

(9) Mungall (A.G.), Morris (D.), Daams (H.) and Bailey (R.), Atomic hydrogen maser development at the National Research Council of Canada. Metrologia, 4, n° 3, 1968, pp. 87-94.

leur stabilité à court terme. On fait aussi des recherches sur le déplacement dû à la lumière dans les cellules passives à vapeur de ^{87}Rb .

Sur le maser à hydrogène, on cherche à déterminer les temps de relaxation T_1 et T_2 caractéristiques du revêtement de la paroi. Pour du "dri-film" les mesures donnent $T_1 \approx T_2 \approx 0,3$ s pour un ballon de 15 cm de diamètre.

ISTITUTO ELETTROTECNICO NAZIONALE (I.E.N.), Turin

Il n'y a pas, en ce moment, de recherches sur d'autres étalons, sauf des analyses expérimentales de la stabilité à très court et, à très long terme des étalons passifs à rubidium de construction commerciale. Un de ces étalons (à Rome) est comparé d'une façon permanente avec l'étalon à césium IEN 2 (à Turin).

LABORATOIRE SUISSE DE RECHERCHES HORLOGÈRES (L.S.R.H.) Neuchâtel

Les seuls autres étalons étudiés au L.S.R.H. sont les masers à hydrogène.

Le problème principal de nos études est la mesure des effets de paroi et l'amélioration de la reproductibilité des couches de fluorocarbure polymérisé déposées sur la paroi du ballon de stockage. Une technique de fabrication mise au point au L.S.R.H. a été décrite au Colloque International de Chronométrie 1969⁽¹⁰⁾. Le coefficient de correction K obtenu est égal à $0,515 \pm 0,028$ Hz·cm et la fréquence de l'hydrogène mesurée est de $1\ 420\ 405\ 751,778 \pm 0,003\ 6$ Hz. Ces valeurs provisoires sont en cours de vérification au moyen de mesures répétées avec plusieurs ballons traités selon la même technique. De plus, de nouvelles techniques de dépôt des revêtements sont à l'étude.

Actuellement, l'exactitude des masers à hydrogène

(10) Menoud (Ch.) et Racine (J.), Résultats nouveaux obtenus avec les masers à hydrogène H 2 et H 3 du L.S.R.H. In "Colloque International de Chronométrie", Paris 1969, Série A (A8).

est limitée par le problème cité ci-dessus et la question de savoir si l'exactitude du maser à hydrogène pourra un jour dépasser celle des résonateurs à jet atomique reste ouverte.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS (N.B.S.), Boulder

A. Nous considérons l'exactitude possible comme le critère principal lorsque l'on compare différents types d'étalons de fréquence existants ou envisagés. L'exactitude possible est l'incertitude combinée de toutes les altérations reconnues de la fréquence de sortie d'un étalon envisagé.

B. Appareils pour lesquels on dispose d'une appréciation expérimentale sérieuse.

B1. Maser à hydrogène. L'exactitude possible actuelle est limitée par l'effet de collision sur les parois à environ 2×10^{-12} . Une seconde limitation (2×10^{-13}) résulte des effets combinés de l'entraînement de fréquence par la cavité et des collisions d'atomes. Des recherches récentes indiquent que ces deux limitations pourront être améliorées d'un facteur dix⁽¹¹⁾.

B2. Étalon à jet de thallium. L'exactitude possible est limitée essentiellement par les mêmes effets que dans le cas du césium. On pourrait donc s'attendre à une exactitude possible de 5×10^{-13} , alors que la meilleure réalisation pratique a donné 3×10^{-12} . A notre connaissance aucun travail n'est actuellement en cours sur un étalon à jet de thallium. La plupart des améliorations des étalons à jet de césium s'appliqueraient aux étalons à jet de thallium⁽¹²⁾.

(11) Hellwig (H.), Vessot (R.F.C.), Levine (M.), Zitzewitz (P.W.), Peters (H.E.), Allan (D.W.) and Glaze (D.J.), Measurement of the unperturbed hydrogen hyperfine transition frequency. (à paraître).

(12) Beehler (R.E.) and Glaze (D.J.), Evaluation of a thallium atomic beam frequency standard at the NBS. IEEE Trans. on Instr. and Meas., IM-15, nos 1 et 2, 1966, pp. 55-58.

B3. Maser à ammoniac. L'exactitude possible est limitée à 1×10^{-11} à cause de l'interaction entre les molécules, de l'influence des champs extérieurs et des effets Doppler. Eu égard au grand effort déjà déployé sur cet appareil, une amélioration est tout à fait improbable.

B4. Cellule à vapeur de rubidium et maser à rubidium. Les limites de ces deux appareils sont dues aux effets des collisions d'atomes, de la lumière de pompage, et de paroi du récipient. Il est vraisemblable que ces effets sont plus importants avec le maser et, de plus, la qualité du maser est également dégradée par l'entraînement par la cavité. L'exactitude possible actuelle est 1×10^{-10} ; il semble tout à fait peu probable que des améliorations notables puissent être apportées.

C. Appareils au début du stade expérimental ou seulement proposés.

C1. Absorption et absorption saturée. Un laser infrarouge ou optique sert d'oscillateur pour explorer une absorption moléculaire à laquelle il est asservi en fréquence. Un exemple expérimental est l'appareil à absorption saturée du méthane à 88 THz qui utilise un laser He-Ne comme source de la radiation de détection⁽¹³⁾. C'est une technique très prometteuse qui peut probablement surpasser tous les étalons existants. On connaît quelques effets qui limitent l'exactitude possible mais ils n'ont pas été entièrement évalués, ni théoriquement ni expérimentalement. On pense que l'exactitude actuelle est d'environ 10^{-11} .

C2. Jet d'hydrogène avec stockage. C'est un tube à jet utilisant le principe du stockage de l'hydrogène du maser à hydrogène⁽¹⁴⁾. Jusqu'ici cela a été seulement proposé, mais des prévisions assez exactes peuvent être faites en se fondant sur l'expérience acquise avec le tube à jet de césium et le maser à hydrogène. Cette technique aussi peut surpasser tous les étalons existants. La seule limitation plus

(13) Barger (R.L.) and Hall (J.L.), Pressure shift and broadening of methane line at 3.39 micron studied by laser-saturated molecular absorption. Phys. Rev. Letters, 22, n° 1, 1969.

(14) Hellwig (H.), The hydrogen storage beam tube, a proposal for a new frequency standard. Metrologia, 6, n° 2, 1970, pp. 56-60.

sévère que 10^{-14} à laquelle on s'attend est l'effet de paroi. Toutefois, le dispositif offre de meilleurs moyens que le maser à hydrogène pour venir à bout de ces effets.

C3. Stockage d'ions. Des ions sont confinés dans un "réceptacle" de stockage créé par un champ électrique oscillant, évitant ainsi le problème des collisions avec les parois. Il faut s'attendre à des difficultés techniques lorsque l'on voudra effectivement créer, exciter et "interroger" les ions. La limitation principale de l'exactitude possible est l'incertitude sur l'effet Doppler de second ordre. Un montage expérimental a utilisé ${}^3\text{He}^+$ à 8,66 GHz⁽¹⁵⁾. On ne peut en évaluer les possibilités sans d'autres essais.

C4. Autres tubes à jet atomique ou moléculaire proprement dit. L'emploi de particules autres que le césium ne donne pas en principe un meilleur étalon à jet, car les limitations du tube à jet de césium ne sont pas essentiellement liées à l'atome de césium lui-même. On ne tient pas compte ici des aspects pratiques qui sont influencés par le choix de l'atome ou de la molécule.

D. Conclusions. Nous considérons, en général, le principe d'asservir un oscillateur à une résonance atomique ou moléculaire, comme supérieur à la production d'oscillations selon le principe du maser ou du laser.

A notre avis, compte tenu de l'état actuel de nos connaissances, deux techniques seulement sont susceptibles de concurrencer ou même de surpasser l'exactitude possible actuelle ou envisagée de la technique traditionnelle du tube à jet (de césium) : ce sont la technique de l'absorption saturée (du méthane) et la technique du jet avec stockage (d'hydrogène).

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (N.P.L.), Teddington

Deux masers à hydrogène fonctionnent au N.P.L. En général, la fréquence est en accord étroit avec celle qui est observée ailleurs, mais on a quelquefois obtenu de fortes

(15) Forston (E.N.), Major (F.G.) and Dehmelt (H.G.), Ultrahigh resolution $\Delta F = 0, \pm 1$ (He^3)⁺ HFS spectra by an ion-storage collision technique. Phys. Rev. Letters, 16, n° 6, 1966.

valeurs de l'effet de paroi. Les recherches se poursuivent.

Comme étape vers une détermination plus exacte de la vitesse de la lumière, on essaie de stabiliser la fréquence d'un laser à HCN (≈ 890 GHz) par absorption moléculaire dans le difluoréthylène (CF_2CH_2). On espère atteindre une reproductibilité de 1×10^{-8} . A des fréquences supérieures, on continue à travailler sur la stabilisation de la fréquence de la radiation visible du laser hélium-néon par absorption saturée dans l'iode.

RADIO RESEARCH LABORATORIES (R.R.L.), Tokyo

Deux masers à hydrogène, du type de laboratoire, sont en service aux R.R.L. depuis 1966. La reproductibilité de réglage et l'exactitude sont de $\pm 5 \times 10^{-13}$ et $\pm 2 \times 10^{-12}$ respectivement.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (P.T.B.), Braunschweig

Aucune recherche n'est faite à la P.T.B. sur les étalons à jet de thallium.

Deux masers à hydrogène ont été construits à la P.T.B. L'un d'eux a pris part à une comparaison internationale de fréquence de masers à hydrogène⁽¹⁶⁾.

A cause des difficultés provenant de l'effet de paroi et pour d'autres raisons, aucune recherche n'est actuellement en cours pour faire du maser à hydrogène un étalon primaire.

Les masers à hydrogène de la P.T.B. sont utiles comme références de fréquence quand la différence de phase entre les deux champs excitateurs de la cavité de l'appareil à jet de césium CS 1 est réglée et/ou ramenée à zéro. En fait, l'incertitude intrinsèque indiquée pour CS 1 est basée sur l'utilisation du maser à hydrogène comme oscillateur auxiliaire.

Il existe à la P.T.B. trois étalons à vapeur de

(16) Becker (G.) und Fischer (B.), Beitrag zum internationalen Wasserstoffmaser-Vergleich mit transportabler Atomuhr. PTB-Mitt., 78, 1968, pp. 177-184

rubidium, de type commercial (type XSR, Rohde und Schwarz, Munich). Après déduction de leur dérive de fréquence ces étalons présentent, pour des durées d'au moins dix jours, une stabilité de fréquence supérieure à celle des horloges à jet de césium Hewlett-Packard (type 5061). C'est pourquoi la combinaison d'un 5061 et d'un XSR est très utile, car elle permet d'avoir accès à la fréquence moyenne du 5061 sur des intervalles d'au moins dix jours avec une durée de mesure (par rapport au XSR) d'environ deux heures.

Cette stabilité de fréquence des étalons XSR permet d'utiliser un XSR comme liaison entre l'étalon primaire CS 1 et le groupe des horloges commerciales à jet de césium de la P.T.B. comparées aux échelles de temps d'autres instituts (au moyen de Loran-C). Il est donc devenu évident que de bons étalons à rubidium sont très utiles pour la comparaison internationale d'étalons primaires et l'établissement d'une échelle de temps atomique international dans laquelle les étalons primaires entrent en jeu.

Une bonne stabilité de la température ambiante est assurée pour les étalons XSR.

Les dérives relatives de fréquence observées sur les XSR sont :

- 0,7 x 10 ⁻¹³	par jour après 6 mois d'utilisation
- 0,5 x 10 ⁻¹³	" " 3 " "
- 0,1 x 10 ⁻¹³	" " 3 " "

QUESTION 2 a

Maintient-on une échelle de temps atomique dans votre laboratoire ou dans votre pays ?

COMMISSION NATIONALE DE L'HEURE (C.N.H.), Paris

Les cinq étalons mentionnés dans la réponse à la question 1a sont situés dans la région parisienne. Ils appartiennent au Centre National d'Études Spatiales (1), au

Centre National d'Études des Télécommunications (3), à l'Observatoire de Paris (1). Leurs différences de temps sont mesurées deux fois par semaine à 0,1 μ s près, par l'intermédiaire des impulsions de télévision. Dans la formation de l'échelle nationale, par moyenne, des corrections de fréquence sont apportées de façon à assurer au mieux l'uniformité de l'échelle en cas d'arrêt ou de modification du réglage d'un ou plusieurs étalons.

L'Observatoire de Paris maintient de plus une échelle coordonnée proche de TUC définie par le B.I.H. Il assure le lien entre l'échelle nationale et les échelles étrangères par réception des impulsions de Loran-C, de Sylt et Estartit (3 récepteurs dont 2 en prêt de la part de l'U.S.N.O.). Plusieurs émissions de fréquences étalons sur ondes très longues sont également reçues.

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES (N.R.C.), Ottawa

On conserve au N.R.C. une échelle de temps atomique, TUA(NRC). Les figures 1 et 2 (voir plus haut à Question 1a) montrent le comportement de cette échelle par rapport aux autres échelles de temps fondées sur des étalons du N.B.S., de la P.T.B., de l'U.S.N.O., de l'O.N., du R.G.O. et de plusieurs laboratoires français (F).

La figure 1 donne les moyennes mensuelles des mesures au moyen du Loran-C pour le N.B.S., l'U.S.N.O., la P.T.B. et le N.R.C. La figure 2 donne les moyennes sur 10 jours des différences entre l'échelle de temps moyenne du B.I.H. et les échelles locales conservées par le N.B.S., l'U.S.N.O., la P.T.B., l'O.N., le R.G.O., le N.R.C. et les laboratoires français (F).

Pendant l'année 1969, TUA(NRC) était fondé sur CS III et produite par un étalon de fréquence à césium du type H-P 5061 A et quatre oscillateurs à quartz auxiliaires à 2,5 MHz. En 1970, un groupe de trois étalons à césium supplémentaires des types H-P 5060 A et 5061 A remplacera les oscillateurs à quartz. Ce remplacement résulte de la fusion du Time Laboratory of the Dominion Observatory avec le laboratoire du N.R.C. Avant cette fusion, les trois

étalons H-P donnaient l'échelle de temps TUC(DO) qui concordait à quelques microsecondes près avec TUA(NRC).

ISTITUTO ELETTROTECNICO NAZIONALE (I.E.N.), Turin

L'échelle de temps atomique de l'I.E.N. est obtenue à partir d'un étalon à césium (H-P 5061 A), deux étalons piézoélectriques à 2,5 MHz et deux à 5 MHz. Ces cinq étalons sont étalonnés, chaque semaine, par rapport à IEN 2.

L'échelle de temps est matérialisée par les cinq systèmes d'horloges correspondants et indépendants entre eux. On prend en considération le bruit caractéristique de chaque système pour établir l'échelle sur des bases statistiques. Ce travail, jusqu'à présent manuel, sera effectué au moyen d'un ordinateur vers la fin de 1970.

L'état de l'échelle est régulièrement vérifié par des comparaisons de phase sur ondes myriamétriques et sur ondes kilométriques ainsi que par réception des signaux Loran-C des réseaux de la Mer Méditerranée et de la Mer du Nord.

Après la dernière synchronisation par transport d'horloge (février 1969), on estime que l'échelle, jusqu'au début d'avril 1970, était encore décalée d'environ $-20 \mu\text{s}$.

Il faut remarquer que, au début de cette période, l'échelle était obtenue à partir de quatre étalons piézoélectriques étalonnés de temps en temps avec IEN 2 mais pas encore d'après l'étalon à césium IEN 3.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS (N.B.S.), Boulder
et U.S. COAST GUARD (U.S.C.G.), Washington

Une échelle de temps atomique est maintenue au National Bureau of Standards : TA(NBS) et à l'U.S. Coast Guard : TUC(USCG).

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (N.P.L.), Teddington

Les échelles de temps TA(NPL) et TUC(NPL) constituent la base pour les écarts publiés des émissions de fréquences étalons à partir des stations de Rugby et de Droitwich. Il sera prochainement possible de relier ces échelles aux échelles correspondantes au B.I.H. par réception des signaux Loran-C de Sylt.

Une autre échelle indépendante de temps atomique est maintenue au Royal Greenwich Observatory ; elle est déjà introduite dans l'horloge atomique moyenne du B.I.H. On espère qu'il sera possible à l'avenir de combiner les échelles du R.G.O. et du N.P.L. pour obtenir une échelle atomique nationale.

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY (N.R.L.M.)
et RADIO RESEARCH LABORATORIES (R.R.L.), Tokyo

Trois échelles de TUC sont maintenues de façon indépendante à l'I.L.O.M., au R.R.L. et au T.A.O. On étudie en ce moment l'établissement d'un temps atomique national composé de ces échelles de temps.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (P.T.B.), Braunschweig

La P.T.B. dispose d'une échelle de temps atomique TA(PTB) (\equiv A1(PTB)) comme échelle de temps indépendante fondée sur les étalons de la P.T.B. Par des moyens électroniques on obtient à partir de TA(PTB) une échelle de temps "décalée" correspondante TUA(PTB) permettant de faciliter les comparaisons avec le système TUC.

La P.T.B. essaie de maintenir les unités de ses échelles de temps aussi constantes que possible. Comme les échelles de temps de la P.T.B. ont commencé avant que l'on ne dispose de l'étalon primaire CS 1, l'unité de l'échelle TA(PTB) n'est pas égale à celle de CS 1. Actuellement, TA(PTB) est donné par un groupe d'horloges atomiques commerciales comprenant des étalons à vapeur de rubidium, CS 1 étant utilisé pour maintenir constante l'unité de l'échelle.

Pour le moment, nous n'avons pas l'intention de modifier l'unité de l'échelle TA(PTB) pour la faire concorder avec CS 1 ; les raisons en ont été exposées dans un article publié en 1969⁽¹⁷⁾.

A partir de TA(PTB), une échelle de temps conforme au système TAS est diffusée par la P.T.B. au moyen de l'émetteur DCF 77 (77,5 kHz, en service continu depuis juin-juillet 1970). La phase de l'oscillateur atomique pilote est ajustée par la P.T.B. de façon que l'émission de DCF 77 suive de très près TAS(BIH). Par extrapolation TAS(BIH) est connu à la P.T.B. avec une incertitude d'environ 1 μ s.

En utilisant l'échelle de temps atomique de la P.T.B. disponible à la station émettrice (DCF 77), le Deutsches Hydrographisches Institut (D.H.I.) fournissait dans le passé des signaux horaires TUC qui étaient émis par DCF 77 (alternativement avec l'émission de TAS de la P.T.B.). Depuis le 1^{er} avril 1970, seuls les signaux horaires TAS de la P.T.B. sont émis par DCF 77.

Le D.H.I. continue à fournir une échelle de temps TUC en liaison avec ses tâches relatives à la navigation.

ROYAL GREENWICH OBSERVATORY (R.G.O.), Hailsham

GA 2 est une échelle de temps atomique indépendante déterminée au R.G.O. à partir des étalons du R.G.O. et comparée de façon régulière à d'autres échelles indépendantes. Elle est en accord étroit avec l'échelle moyenne TA(BIH) à laquelle elle contribue. L'échelle précédente (GA) était fondée à l'origine sur des étalons du National Physical Laboratory et remonte à juin 1955. La relation entre les deux échelles est telle que $GA - GA 2 = 0,957\ 700$ s ; ainsi l'échelle de temps atomique du R.G.O. est effectivement continue depuis juin 1955.

TUC(RGO) est calculée à partir de GA 2.

(17) Becker (G.), Zum Problem künftiger Zeitskalen. PTB-Mitt., 79, 1969, pp. 441-446. (Voir le paragraphe 9).

LABORATOIRE SUISSE DE RECHERCHES HORLOGÈRES (L.S.R.H.)
et OBSERVATOIRE DE NEUCHÂTEL

L'heure de l'Observatoire de Neuchâtel est basée actuellement sur deux étalons à césium (Hewlett-Packard et Ébauches). Deux masers à hydrogène sont opérationnels au L.S.R.H. ; l'étude de l'effet de paroi retarde encore leur mise en service pour le maintien de l'heure.

INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE MARINA, San Fernando

Actuellement, aucune échelle de temps atomique n'est maintenue en Espagne. On envisage dans un avenir proche l'établissement pour les besoins de la Marine d'une échelle atomique fondée sur un étalon commercial à césium qui sera installé à l'Observatoire Naval de San Fernando.

QUESTION 2 b

L'échelle moyenne obtenue au Bureau International de l'Heure (B.I.H.) semble-t-elle satisfaisante, et des améliorations sont-elles désirables ?

BUREAU DES LONGITUDES, Paris

L'échelle moyenne du B.I.H. est satisfaisante dans son principe et dans sa construction. Il faut noter à son propos les points suivants :

1° C'est la seule échelle de temps atomique qui ait été suivie continûment depuis le 1^{er} juillet 1955. De plus, c'est celle qui est reconnue par l'Union Astronomique Internationale comme échelle de référence. Les autres échelles nationales y sont systématiquement comparées et raccordées.

2° Formée par la moyenne de plusieurs échelles de temps atomique de qualités comparables, elle est de qualité au moins aussi bonne, peut-être meilleure que chacune d'entre

elles prise séparément. On peut évaluer sa stabilité à quelques 10^{-13} et l'exactitude de sa seconde à environ 10^{-12} .

3° La façon dont elle est construite assure que les améliorations techniques seront répercutées dès qu'elles seront adoptées pour les échelles nationales utilisées. Elle ne suit donc pas immédiatement le progrès que peut constituer l'apparition de quelques étalons expérimentaux de qualité supérieure, mais la souplesse introduite par le calcul et la possibilité qu'il y a de jouer sur les poids ont le double avantage de permettre de répercuter le progrès technique dans l'échelle assez rapidement, tout en se gardant des aléas que représenterait une échelle internationale basée sur un nombre trop restreint d'étalons.

Cela paraît à tout point de vue satisfaisant étant bien entendu cependant que ce n'est pas à ce type de construction qu'il faut s'adresser pour avoir la meilleure estimation possible de l'unité de temps, mais seulement la meilleure estimation possible de l'échelle de temps, dont la qualité fondamentale est la continuité et l'uniformité.

En d'autres termes, il semble utile, dans les conditions présentes, de séparer la notion de construction d'une échelle de temps atomique de celle de la diffusion de l'unité de temps. Ainsi, par exemple, si l'on disposait dans le monde de deux masers uniformes et exacts à 10^{-14} près, alors que tous les autres étalons disponibles seraient plus mauvais, il serait peu réaliste pour des raisons pratiques (possibilités de pannes) autant que diplomatiques de fonder l'échelle de temps atomique (si on la veut internationale) sur ces deux seuls masers.

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES (N.R.C.), Ottawa

L'échelle moyenne de temps du B.I.H. est établie de façon à fournir le degré d'uniformité le plus élevé possible et une exactitude qui soit du même ordre que celle des meilleurs étalons de temps dont on dispose. Pendant l'année 1969, selon le rapport du B.I.H., cette échelle a été fondée sur 32 horloges à césium ; 29 d'entre elles

étaient de conception identique (H-P) et 3 de conceptions différentes. Parmi ces trois horloges, l'une utilise un tube à jet de césium de Hewlett-Packard et les deux autres, celles du N.B.S. et du N.R.C., sont des étalons de laboratoire à long jet, tous les deux d'une conception différente. On a attribué aux horloges Hewlett-Packard un poids total de 6 et à chacune des deux autres un poids de 1.

La marche de l'échelle moyenne du B.I.H. a été déterminée à l'origine d'après la moyenne pondérée des trois échelles initiales, celles de la P.T.B., de l'U.S.N.O. et de la France, qui utilisaient toutes des étalons Hewlett-Packard.

Sur la figure 2 (voir plus haut à Question 1a), qui donne les marches approximatives des échelles composantes par rapport à l'échelle moyenne de temps du B.I.H., il apparaît que maintenant toutes les échelles de temps sauf une retardent par rapport à l'échelle moyenne du B.I.H. Les marches varient d'environ $26 \mu\text{s}$ par an (8×10^{-13}) de retard à $27 \mu\text{s}$ par an (9×10^{-13}) d'avance, avec une moyenne (si l'on attribue à chaque marche le poids spécifié) d'environ $8,5 \mu\text{s}$ par an ($2,7 \times 10^{-13}$) de retard par rapport à l'échelle moyenne du B.I.H. Cela montre que l'échelle moyenne du B.I.H. ne satisfait pas en fait les exigences initiales d'uniformité et d'exactitude. Toutefois on pourrait examiner certaines questions. Bien qu'à l'heure actuelle un écart de $2,7 \times 10^{-13}$ soit inférieur à l'exactitude admise de n'importe lequel des étalons pris individuellement, peut-être serait-il plus approprié dans l'état actuel des choses de modifier les valeurs de B de façon à ramener la marche moyenne des échelles composantes à peu près à zéro ? Cela modifierait d'autant l'uniformité, mais ne devrait pas poser de problème sérieux étant donné la petitesse de la modification. Une autre question concerne l'opportunité d'attribuer un poids aussi important aux horloges Hewlett-Packard qui sont de construction essentiellement identique. Il est exact que la marche moyenne de 20 de ces horloges (U.S.N.O. et R.G.O.) concorde très étroitement avec celle de l'étalon à long jet du N.R.C., mais elle diffère d'environ 5×10^{-13} de celle de l'étalon

du N.B.S. (7×10^{-13} s'il faut ajouter une correction relativiste). On doit donc poser la question : le système actuel de pondération est-il bien choisi pour l'exactitude la meilleure et doit-on interpréter un accord étroit comme l'exactitude ?

ISTITUTO ELETTROTECNICO NAZIONALE (I.E.N.), Turin

Nous, estimons que l'échelle moyenne du B.I.H. est satisfaisante, tant pour l'uniformité que pour l'exactitude.

Néanmoins il faudrait, peut-être, considérer de nouveau le poids à donner aux échelles d'après l'expérience qui a été acquise dernièrement. Nombreuses sont en effet les propositions à ce sujet⁽¹⁸⁾, mais les résultats semblent encore insuffisants.

On propose donc que le C.C.D.S. veuille bien considérer le problème du poids, dont l'étude a aussi été récemment proposée par le C.C.I.R.^(*).

On estime que le but principal du B.I.H. étant d'assurer la pérennité et l'uniformité de son échelle, toutes les autres décisions devraient être prises conformément à ce but.

On propose aussi que le B.I.H. publie dans son bulletin mensuel les écarts entre quelques réseaux Loran-C et son échelle TUC.

(18) Basri (S.A.), Time standards and statistics. IEEE Trans., IM-16, 1967, pp. 19-22.

Crow (E.L.), The statistical construction of a single standard from several available standards. IEEE Trans. IM-15, 1964, pp. 180-184.

Leschiutta (S.), Conservazione a lungo termine di scale di tempo. In "Atti del colloquio sui problemi della determinazione, conservazione e sincronizzazione del tempo", Milano, 1968.

(*) C.C.I.R., XII^e Assemblée Plénière, Document VII/1025.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS (N.B.S.), Boulder

L'échelle de temps atomique TA(BIH) est très utile, mais des dispositions devraient être prises pour conserver l'unité de base de l'échelle proche de la meilleure estimation de l'unité [de temps]. Dans l'état actuel des choses, par exemple, toute dérive systématique (si elle existait) des étalons de fréquence commerciaux se répercuterait sur TA(BIH). Il en est ainsi à cause de l'algorithme de la moyenne utilisé dans l'établissement de TA(BIH) aussi bien que de l'algorithme utilisé dans l'établissement de TA(USNO) (c'est-à-dire A1). Il est fort peu probable que l'unité (la seconde) de l'échelle de temps TA(BIH) continuera à être la "meilleure estimation" de la seconde réelle, si l'on ne prend pas de dispositions pour mettre à jour l'unité de base de l'échelle.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (N.P.L.), Teddington

Nous sommes d'accord avec les vues exprimées dans le document CCDS/70-5 (extrait du Rapport Annuel du B.I.H. pour 1969), selon lesquelles le but recherché en constituant l'horloge moyenne du B.I.H. doit être d'atteindre un degré d'uniformité aussi élevé que possible. Une échelle extrêmement uniforme a été obtenue en utilisant un grand nombre d'étalons à césium de type commercial (Hewlett-Packard), ainsi qu'un procédé approprié de calcul pour ajouter ou retrancher des horloges sans modifier la moyenne. En ce qui concerne l'unité de base, on peut voir d'après le tableau B du document 70-5 (p.28) que l'unité moyenne définie par les quatre laboratoires ajoutés plus récemment, comprenant deux étalons primaires, diffère de $5,5 \times 10^{-13}$ de la moyenne pondérée originelle fondée entièrement sur des étalons de type commercial. Cette différence est comparable à l'incertitude associée aux meilleurs étalons primaires et, bien qu'elle ne nécessite pas vraiment une révision de l'unité de l'échelle, elle attire l'attention sur la nécessité de définir l'unité de l'échelle à l'endroit, par exemple, où se trouve le B.I.H. et d'établir la relation entre cette unité et la seconde (SI).

Pour l'uniformité à long terme de l'échelle de

temps il existe des dangers évidents à inclure un grand nombre d'étalons provenant d'un seul fabricant et il faut rechercher des méthodes de pondération plus raffinées qui permettent de déceler et de contrôler l'effet des dérives systématiques de fréquence des appareils Hewlett-Packard.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (P.T.B.), Braunschweig

Le B.I.H. fait du bon travail dans ce domaine. Toutefois, des améliorations de la qualité des échelles de temps atomiques du B.I.H. sont en principe souhaitables. Les échelles du B.I.H. sont trop fortement fondées sur des horloges commerciales du même type qui vont certainement présenter le même comportement moyen et entraîner, selon toute probabilité, une dérive systématique de l'unité de l'échelle TA(BIH). Une solution pour venir à bout de ce problème a été proposée au B.I.H. par lettre (mai 1969), puis publiée⁽¹⁷⁾. La solution proposée tente d'assurer un compromis entre deux exigences de l'échelle internationale de temps :

1. grande continuité (unité de l'échelle constante) ;
2. valeur exacte de l'unité de l'échelle selon sa définition.

La mise en oeuvre de cette proposition sera facilitée par un plus grand nombre d'étalons primaires à jet de césium de haute qualité qu'il n'en existe maintenant.

D'autres progrès pour TA(BIH) peuvent provenir de la mise au point et de l'utilisation de méthodes appropriées et plus raffinées pour obtenir les moyennes. Dans ce domaine, un programme d'étude dû à l'initiative de la République Fédérale Allemande a été confié au C.C.I.R. (Commission d'Études VII). Le C.I.P.M. (B.I.P.M., C.C.D.S. ou un Comité Consultatif des Échelles de Temps auprès du C.I.P.M., s'il est créé) devra s'occuper de ces problèmes.

Pour l'avenir, il est souhaitable de connaître TA(BIH) (ou TAS(BIH)) encore plus rapidement que cela n'est possible actuellement. Des messages par téléscripteurs devraient être utilisés (voir la réponse de la P.T.B. à la question 4a).

ROYAL GREENWICH OBSERVATORY (R.G.O.), Hailsham

Il convient de décider s'il est plus important de chercher à préserver l'uniformité dans l'échelle TA ou si l'échelle devrait être fondée sur la meilleure estimation de l'unité employée. L'opinion du R.G.O. est que l'échelle devrait être fondée sur la meilleure estimation de l'unité. Dans les deux cas, on devra prévoir des déterminations régulières de l'échelle TA par rapport aux étalons primaires du N.B.S., du N.R.C., du N.P.L., de la P.T.B., du L.S.R.H., etc.

En l'absence d'instructions contraires, le B.I.H. a choisi comme principe de chercher à préserver l'uniformité de l'échelle TA. Cela est réalisé en faisant une moyenne pondérée d'un certain nombre d'étalons à césium de telle sorte qu'il n'y ait aucune discontinuité de temps ni de fréquence ; l'unité, et par conséquent la marche de l'échelle de temps, a été fixée par les trois étalons choisis à l'origine (USNO, PTB et F). Quand un nouvel étalon est ajouté, son temps et sa fréquence sont ajustés de façon arithmétique de telle sorte que l'échelle moyenne TA ne soit pas modifiée. Quand un ancien étalon est enlevé, on applique des corrections à tous les autres étalons de telle sorte que la moyenne demeure inchangée. Des changements comparables sont faits lorsque les poids attribués sont modifiés ou que l'on observe des variations significatives de la fréquence d'un étalon.

Ainsi, l'échelle TA, qui est obtenue à partir d'un certain nombre d'étalons, avec un nombre toujours plus grand de corrections, n'est ni la moyenne des étalons utilisés ni la meilleure estimation de l'unité. Il est possible qu'une dérive de l'échelle à partir de l'unité originelle se poursuive.

Cette méthode doit être revue de façon que l'échelle internationale de TA fournisse, de façon courante, la meilleure valeur disponible de l'unité. Toute nouvelle horloge incluse dans la moyenne devrait être évaluée par rapport à la meilleure estimation du moment. Toute horloge s'écartant de la moyenne, qui comprend maintenant un grand nombre d'étalons, n'entraînerait pas de variations plus grandes que celles qui se produisent déjà et demeurent non

décelées. Il n'y a aucun étalon d'après lequel un instant dans l'échelle TA peut être vérifié avec un degré d'exactitude utile, mais la marche peut être évaluée lorsque l'occasion se présente en fonction de la fréquence des étalons primaires. L'utilisation d'un grand nombre d'étalons dans l'établissement de la moyenne devrait assurer un degré d'uniformité élevé ; les ajustements de la marche résultant de la réévaluation de l'unité seraient petits. Une telle échelle constituerait une approximation étroite de la vraie valeur, et non plus une estimation d'une valeur originelle que l'on ne peut obtenir maintenant.

OBSERVATOIRE DE NEUCHÂTEL

Le B.I.H. s'étant proposé le maintien d'une échelle de temps avant tout uniforme, ce but est atteint à la précision de l'ordre de $\pm 1 \times 10^{-13}$. La question de savoir si l'uniformité de l'échelle est le critère primordial ou si, par une répartition différente des poids attribués aux étalons des différentes institutions, c'est l'exactitude de l'échelle qui doit primer, n'est pas une question que le B.I.H. a pu trancher jusqu'ici, faute d'instructions de la part d'un organe compétent. La création d'un tel organe, habilité à prendre de telles décisions et à les transmettre au B.I.H. est justement l'objet de la 5^e session du C.C.D.S.

AUTRES LABORATOIRES

La Commission Nationale de l'Heure (Paris) et les laboratoires japonais considèrent que l'échelle moyenne établie par le B.I.H. semble satisfaisante pour le moment.

L'U.S. Coast Guard n'utilise pas actuellement l'échelle du B.I.H. ; il estime cependant que le caractère le plus important d'une échelle internationale est l'uniformité.

L'Instituto y Observatorio de Marina (San Fernando) considère que l'échelle moyenne obtenue au B.I.H. selon les critères décrits dans le document CCDS/70-5 est l'une des

solutions les plus parfaites pour le moment, tout au moins en ce qui concerne l'uniformité.

L'exactitude des étalons individuels qui interviennent dans l'établissement de cette échelle ne permet pas de réaliser l'échelle idéale à 10^{-13} près. Les méthodes statistiques ne sont pas à même de déceler les erreurs de fréquence possibles.

QUESTION 3 a

Est-il important de définir une échelle de temps atomique international, et pour quelles raisons ?

BUREAU INTERNATIONAL DE L'HEURE et BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

L'établissement d'une échelle de temps atomique international nous semble une conséquence logique de la définition de la seconde ; le C.I.P.M., avec l'aide d'un Comité Consultatif, devrait donc participer aux responsabilités de l'établissement de cette échelle.

Nous pensons que cette échelle est d'un intérêt primordial pour la mécanique appliquée aux astres naturels du système solaire et aux corps célestes artificiels. En effet, l'idée que le temps atomique pourrait être l'argument de la mécanique céleste classique, en remplacement du temps des éphémérides, commence à être discutée ; cette utilisation suppose une échelle extrêmement précise à cause de la longue durée des observations astronomiques.

BUREAU DES LONGITUDES, Paris

Il est important de définir une échelle de temps atomique international pour plusieurs raisons :

1° C'est une conséquence logique de la définition de

la seconde. D'un point de vue légal aussi, il est nécessaire que l'échelle de temps pratiquement en usage soit constituée par une succession de secondes légales.

2° Des échelles uniformes existantes (comme le Temps des Éphémérides), c'est celle qui est la plus accessible et la plus exacte (sauf pour le passé antérieur à 1955 en ce qui concerne l'accessibilité).

3° Il est nécessaire, pour éviter des confusions qui pourraient être regrettables, que les divers systèmes de synchronisation (navigation, procédés anti-collisions aériennes, etc.) soient basés sur la même échelle. Seule l'existence d'une échelle internationale peut obliger une telle uniformisation. Même si certaines de ces échelles particulières ont des propriétés d'exactitude ou d'uniformité différentes, leur identité de base éviterait des erreurs graves dans le cas, probable, où elles seraient utilisées consciemment ou non à des fins différentes de leur but spécifique.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS (N.B.S.), Boulder

Il est important d'établir une échelle de temps atomique international. Cela a été confirmé par l'U.R.S.I. le C.C.I.R., les activités actuelles du B.I.H. et la Commission préparatoire d'octobre 1968. Fondamentalement, une échelle de temps atomique est importante à cause de l'emploi croissant de synchronisations précises entre des lieux éloignés et de l'emploi croissant des mesures précises de fréquence. Par exemple, un important fabricant américain de fréquencesmètres permettant des mesures à 10^{-10} , modifie systématiquement la base de temps de -3×10^{-8} . Le fréquencesmètre est gradué en "Hz" !

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (N.P.L.), Teddington

On a besoin d'une échelle de temps atomique international comme base du système TAS (1 s) qui sera introduit universellement en 1972, à la suite de la Recommandation du C.C.I.R. Elle fournira donc le cadre essen-

tiel pour toutes les mesures de temps, relatives ou non, dans le monde entier. En particulier, elle facilitera beaucoup les opérations, telles que la radio-interférométrie sur de longues distances, qui nécessitent la synchronisation précise d'horloges éloignées.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (P.T.B.), Braunschweig

Pour la P.T.B., il est important que le C.I.P.M. définisse et introduise une échelle de temps atomique international: Les membres de la P.T.B. sont à l'origine d'une "Résolution" de l'U.R.S.I. dans ce sens (Ottawa, août 1969), d'une "Opinion" du C.C.I.R. (Genève, octobre 1969), et d'une proposition directe au C.I.P.M.⁽¹⁹⁾ exprimant le point de vue officiel de la P.T.B. qui peut être résumé ainsi :

1. Les intervalles de temps doivent être mesurés en fonction de l'unité de temps telle qu'elle est définie par la C.G.P.M.

2. Comme le début et la fin des intervalles de temps à mesurer peuvent être définis par des événements survenant dans des pays différents, un système de temps atomique couvrant le monde entier est nécessaire pour permettre des mesures d'intervalles de temps dans des conditions pratiques.

3. La définition et l'introduction d'un tel système de temps doivent être assurées par une organisation internationale et intergouvernementale appropriée, au mieux par l'un des organismes issus de la Convention du Mètre. Comme il est exposé dans la référence⁽¹⁹⁾, ce n'est pas en fait la tâche du C.C.I.R., bien que par le passé ce travail ait été fait en partie par lui.

4. Le besoin pratique d'une échelle de temps atomique international est prouvé par le fait que le B.I.H. calcule déjà une telle échelle avec la contribution de nombreux laboratoires.

La P.T.B. considère cette échelle TA(BIH) et les échelles TUC(BIH) et TAS(BIH) (bien que d'utilisation

(19) Procès-Verbaux C.I.P.M., 37, 1969, pp. 118-121.

générale et recommandées par le C.C.I.R.) comme des échelles expérimentales qui ne peuvent devenir des échelles de temps légales dans un pays, car le B.I.H. n'est pas une organisation intergouvernementale et les gouvernements ne jouent aucun rôle d'organisation dans la formation de TA(BIH).

AUTRES LABORATOIRES

Les réponses reçues des autres laboratoires (Commission Nationale de l'Heure, Paris, Conseil National de Recherches, Ottawa, Istituto Elettrotecnico Nazionale, Turin, Laboratoires japonais, Royal Greenwich Observatory, Hailsham, U.S. Coast Guard, Washington, Observatoire de Neuchâtel, Instituto y Observatorio de Marina, San Fernando) sont toutes favorables à une définition, à l'établissement et à la diffusion d'une échelle de temps atomique international étant donné l'importance d'une telle échelle pour les divers domaines de la physique, de l'astronomie, de la navigation aérienne, maritime, spatiale, etc.

QUESTION 3 b

Les effets relativistes doivent-ils être pris en considération, dès maintenant ou dans un proche avenir ?

COMMISSION NATIONALE DE L'HEURE (C.N.H.), Paris

Les effets relativistes doivent être, dès maintenant, pris en considération, en particulier pour la comparaison des horloges réparties sur le globe ou dans des satellites ; les corrections dues aux différences d'altitude et de vitesse de transport ne sont pas négligeables dans ces comparaisons. (Sur ces questions voir l'Annexe S 8).

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES (N.R.C.), Ottawa

Les résultats des comparaisons portés sur les figures 1 et 2 (voir plus haut à Question 1a) montrent que l'accord entre des échelles de temps séparées et indépendantes peut maintenant être réalisé à quelques microsecondes par an, soit quelques 10^{-13} . L'accord le plus étroit est obtenu entre les étalons du R.G.O., de l'U.S.N.O., du N.R.C. et ceux du système Loran-C lui-même. Quoique des déplacements gravitationnels de fréquence entre ces étalons soient très inférieurs à 1×10^{-13} , un déplacement d'environ $1,7 \times 10^{-13}$ ($5,3 \mu\text{s}$ par an) devrait apparaître entre eux et l'étalon du N.B.S. à Boulder, Colorado, États-Unis. C'est en fait supérieur à la différence existant actuellement entre le groupe des quatre étalons mentionnés. Il faut toutefois souligner que le fait d'appliquer la correction gravitationnelle (on ne sait pas si cette correction a déjà été appliquée) à l'échelle de temps du N.B.S. n'améliorerait pas l'accord entre cette échelle et les autres. Toutefois, l'accord très étroit qui apparaît sur la figure 1 entre les échelles de temps coordonnées des États-Unis (c'est-à-dire U.S.N.O. et N.B.S.), montre qu'il est maintenant possible de coordonner à mieux qu'environ $\pm 1 \mu\text{s}$ des échelles de temps très éloignées.

Il apparaît que si l'on envisage sur un plan mondial une échelle internationale de temps coordonnée, fondée sur un certain nombre d'échelles de temps-coordonnée séparées, il faudra appliquer à chacune des échelles de temps-coordonnée des corrections relativistes. Vraisemblablement, le B.I.H. appliquera cette correction comme il l'a suggéré dans son Rapport Annuel pour 1969.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS (N.B.S.), Boulder

Bien que les effets relativistes ne soient pas importants maintenant, ils devraient devenir significatifs dans les prochaines années avec l'amélioration des étalons de fréquence. Normalement la "Time and Frequency Division" du N.B.S. n'a pas d'expert en théorie de la relativité. Toutefois, il semble que les concepts de la théorie n'en-

trent pas en ligne de compte et que la littérature scientifique fournit une documentation suffisante. On ne devrait pas faire intervenir la théorie de la relativité dans la définition d'une échelle de temps. Nous pensons par exemple que des horloges identiques sur une surface de même potentiel gravitationnel conservent le même temps. Cette propriété ne doit pas faire partie intégrante de la définition de l'échelle de temps ; il serait préférable de spécifier un endroit précis sur la Terre pour une horloge idéale, plutôt que de spécifier simplement "le niveau moyen des océans".

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (N.P.L.), Teddington

Il existe encore des difficultés pour que soient acceptées de façon générale les conséquences de la théorie de la relativité sur les étalons de temps et de fréquence⁽²⁰⁾. Toutefois, dans la pratique, on fait des corrections pour l'effet Doppler de second ordre et pour le potentiel gravitationnel relatif des horloges, par exemple pour celles du N.B.S. (Boulder) et de l'U.S.N.O. (Washington) qui ont une différence d'altitude d'environ 1600 m. On suggère que cette pratique continue dans la réduction de toutes les observations et dans l'extension du système de temps-coordonnée à partir de son origine terrestre à tous les autres points de la Terre. Entre-temps, l'étude doit être continuée en obtenant les opinions des experts et en concevant des expériences qui permettront de vérifier les prédictions de la théorie avec une plus grande certitude.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (P.T.B.), Braunschweig

Situation actuelle et dans un proche avenir

Actuellement, l'incertitude intrinsèque relative des meilleurs étalons primaires de temps à césium ($\approx \pm 5 \times 10^{-13}$) est encore plus grande que la différence relative de fréquence à laquelle il faut s'attendre par

(20) Essen (L.), Proc. I.E.E., 115, 1968, p. 1853.

suite de l'effet relativiste (gravitationnel) entre des étalons de laboratoires situés à des altitudes différentes. (La différence relative de fréquence entre des horloges situées à Boulder et à Braunschweig devrait être environ 2×10^{-13}). Par conséquent, TA(BIH) a le caractère du temps propre ("Eigenzeit") de la surface de la Terre (du fait que les différences d'altitude des laboratoires est encore négligeable). Cette opinion de la P.T.B. a été confirmée par un document du C.C.I.R. (21).

Dans un futur prévisible, on peut penser réduire à 1×10^{-13} l'incertitude relative des étalons primaires. Déjà maintenant la P.T.B. tient compte de la différence d'altitude entre le N.B.S. (Boulder) et la P.T.B. pour obtenir des comparaisons de fréquence plus sûres entre les étalons NBS-III et CS 1 de la P.T.B. C'est pourquoi nous recommandons de définir l'échelle de temps atomique internationale comme une échelle de temps-coordonnée. A plusieurs reprises la P.T.B. a fait cette proposition (17)(22)(23)(24)(25)(26); elle a été à l'origine des documents du C.C.I.R. sur ce problème ou bien elle leur a apporté son appui. (Voir aussi la référence (19)).

Proposition pour la désignation des échelles de temps

Comme cette échelle de temps sera, bien entendu, une échelle "coordonnée", son nom complet devrait être :

(21) C.C.I.R., Document VII-1029, 15 Oct. 1969.

(22) Becker(G.), Fischer(B.), Kramer(G.) und Müller (E.K.), Die Definition der Sekunde und die Allgemeine Relativitätstheorie. PTB-Mitt., 77, 1967, pp. 111-116.

(23) Becker(G.), Die Neudefinition der Sekunde und das Problem künftiger Definitionen von Zeitskalen. PTB-Mitt., 78, 1968, pp. 270-275.

(24) C.C.D.S., 4^e session, 1967, Document 67-13.

(25) C.C.D.S., 4^e session, 1967, Document 67-16.

(26) Becker(G.), La nouvelle définition de la seconde et les théories relativistes. C.C.D.S., 4^e session, 1967, pp. S27-S28.

"Temps (ou Échelle de Temps)-Coordonnée Atomique International Coordonné". (En anglais dans le texte original : "International Coordinated Atomic Coordinate Time (or Time Scale)").

Notre proposition pour le nom de l'échelle à définir et à introduire est :

"Temps (ou Échelle de Temps) International", "TI".

Il n'est pas nécessaire de mentionner que le système de temps est coordonné ni que ce sont des atomes qui permettent de l'obtenir. Que le système est coordonné (c'est-à-dire que les signaux horaires sont, plus ou moins, synchronisés dans le monde entier) est évident en soi ; autrement ce ne serait pas un système international.

Il nous faut faire une distinction entre le concept d'une échelle idéale sans aucune imperfection et l'échelle pratiquement réalisée avec toutes ses imperfections. Seule l'échelle réalisée peut être d'un intérêt métrologique (et légal). C'est cette échelle que nous appellerons TI dans la suite et c'est elle qu'il faut définir et introduire de façon officielle.

Apparemment, il faut désigner ce concept de temps idéal, dont TI n'est en quelque sorte qu'une approximation. Dans des publications et des documents antérieurs de la P.T.B. (24)(25)(26)(23) nous avons appelé ce temps-coordonnée (idéal) "Temps Terrestre", avec l'abréviation "TT", par opposition à "Temps Céleste".

Proposition pour la définition de l'unité de l'échelle TI

On peut utiliser le plan suivant :

1. L'unité (la seconde) de l'échelle du Temps International est celle qui est évaluée par le B.I.P.M. comme approximation de la seconde du Temps Terrestre.
2. La seconde du Temps Terrestre est ...

Nous avons plusieurs propositions pour la définition de la seconde de TT. Selon notre proposition antérieure (24)(23) la définition pourrait être :

Proposition 1 : "La seconde du Temps Terrestre est la durée de 9 192 631 770 périodes de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 au repos, à la surface du géoïde".

Cette définition implique que pour un lieu non situé sur la surface du géoïde, la seconde (fondée sur les atomes de césium au repos à la surface du géoïde) doit être transmise en ce lieu. Il va de soi sans le dire qu'il convient de tenir compte des lois physique qui entrent en jeu dans le problème de la transmission.

Si on a le sentiment que la définition n'est pas suffisamment claire en ce qui concerne le problème de la transmission, une autre formulation (évitant aussi une formule) pourrait être :

Proposition 2 : "La seconde du Temps Terrestre en un endroit spécifié qui est au repos par rapport au géoïde est la seconde (du SI) telle qu'elle est transmise depuis un endroit au repos à la surface du géoïde jusqu'à l'endroit spécifié".

Si l'on pense qu'il n'est pas nécessaire de mentionner explicitement dans la définition le problème du "transport" de la seconde du lieu de référence (au repos) au lieu d'intérêt, on aura une autre solution :

Proposition 3 : "La seconde du Temps Terrestre est la seconde (du SI) telle qu'elle est produite (en un endroit) au repos à la surface du géoïde".

Il n'est pas inévitablement nécessaire de se rapporter dans la définition de TT au concept de TT, mais cela peut au moins aider à éclairer l'ensemble des problèmes et peut-être simplifier la formulation de la définition. Une proposition (sur la base de la proposition 3) évitant de mentionner TT serait :

Proposition 4 (définition complète) : "L'unité (la seconde) de l'échelle du Temps International est celle qui est évaluée par le B.I.P.M. comme approximation de la seconde (du SI) telle qu'elle est produite en un endroit au repos à la surface du géoïde. (L'évaluation du B.I.P.M. est basée sur les contributions des pays adhérents à la Convention du Mètre.)".

Les définitions doivent être acceptables pour ceux qui ont des doutes quant à la validité de la théorie de la relativité générale.

Nous recommandons de ne pas utiliser dans la définition les expressions "temps propre" ou "temps-coordonnée".

Origine de l'échelle de temps TI

Définir l'origine revient à attribuer des valeurs numériques spécifiques à des instants spécifiques de l'échelle. C'est un problème de commodité et une affaire de convention. Sans doute le B.I.H. aura des propositions à faire (qui devront être discutées par le C.C.D.S.) sur la façon de rattacher TI aux échelles de temps atomique existant actuellement pour éviter dans toute la mesure du possible des discontinuités.

Conséquences pratiques

On parle souvent du changement de fréquence avec l'altitude à cause du changement du potentiel gravitationnel (voir par exemple⁽²²⁾⁽²¹⁾). Dans la pratique, on pourrait considérer le niveau de la mer comme une approximation suffisante de la surface du géoïde. Ceux qui désirèrent produire une approximation de la seconde de l'échelle TI ou de celle de TT doivent changer ("corriger") la fréquence de leurs étalons selon leur altitude au-dessus du niveau de la mer.

INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE MARINA, San Fernando

Lorsqu'il sera établi que l'exactitude de l'échelle moyenne est meilleure que 10^{-13} , il sera nécessaire de spécifier le potentiel de référence de l'échelle internationale coordonnée et d'introduire des corrections relativistes. Il est possible d'introduire ces corrections dès maintenant, mais l'incertitude sur la fréquence (ou sur les coefficients β_1 dans la notation du B.I.H.) atteindra l'incertitude sur le potentiel de référence qui, par suite, ne devrait pas être mentionné dans la définition de l'Échelle Internationale.

AUTRES LABORATOIRES

Pour l'Istituto Elettrotecnico Nazionale (Turin), le problème des effets relativistes se posera évidemment lorsque les divergences annuelles entre les échelles locales de temps atomique seront réduites à quelques microsecondes.

Les Laboratoires japonais estiment que les effets relativistes devront être pris en considération dans un

proche avenir.

Les effets relativistes ne sont pas actuellement importants pour l'U.S. Coast Guard (Washington) ; ce laboratoire reconnaît cependant que ces effets doivent être considérés dans la mesure où ils interviendront dans l'utilisation future d'une échelle internationale de temps.

QUESTION 4 a

Si le Comité International des Poids et Mesures propose à la Conférence Générale une définition formelle d'une échelle de temps atomique international, il devra en même temps expliquer par quels moyens cette échelle peut être établie, maintenue, et diffusée ; il devra donc présenter un programme de travail, avec le budget correspondant, et soumettre ce budget au vote de la Conférence.

Quel est le programme de travail qui vous paraît désirable, et quel est le montant du budget correspondant ?

BUREAU INTERNATIONAL DE L'HEURE (B.I.H.), Paris

Pour le moment, le travail du B.I.H. donne des résultats concrets qui semblent donner satisfaction aux utilisateurs du temps atomique.

Un budget annuel de 100 000 à 150 000 dollars serait nécessaire pour créer et maintenir un service qui ferait le même travail.

ISTITUTO ELETTROTECNICO NAZIONALE (I.E.N.), Turin

On confirme la proposition de confier l'établissement de l'échelle atomique internationale au B.I.H.

En ligne générale, on estime que le type actuel de travail doit être maintenu avec certaines modifications sur le plan administratif et scientifique.

La question du programme de travail et du budget correspondant a été considérée par l'I.E.N., et nous avons estimé que rien de certain ne peut être formulé sans des

contacts préalables avec la direction du B.I.H. En effet, cette direction seule possède tous les éléments d'organisation qu'il est nécessaire de connaître avant d'arriver à un programme financier.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS (N.B.S.), Boulder

A notre avis, le C.I.P.M. devrait proposer une définition formelle d'une échelle de temps atomique international à la C.G.P.M. et recommander en même temps les moyens de l'établir, de la conserver et de la diffuser. Ainsi, le C.I.P.M. devrait soumettre un programme de travail et un budget correspondant au vote de la Conférence Générale.

Le programme de travail peut être divisé en deux parties.

I. Matériel

a) Acquisition : quatre horloges à césium au moins, dont l'une devrait être transportable ; matériel récepteur adéquat (par exemple Loran-C) ; matériel de comparaison (par exemple compteurs) ; moyens de calcul.

b) Services d'entretien et de réparations.

II. Calcul de l'échelle de temps

- a) Acquisition de données.
- b) Traitement et évaluation.
- c) Mise à jour des méthodes de traitement et étalons de référence complémentaires.
- d) Publications des résultats.

Le budget nécessaire à la mise en oeuvre de ce programme de travail dépendra, dans une certaine mesure, de l'algorithme réellement utilisé pour obtenir l'échelle de temps atomique international à partir des échelles de temps individuelles (nationales). Le budget nécessaire dépend également de la part prise par le B.I.H. et du matériel qui pourrait y être temporairement disponible. Dans sa lettre du 3 décembre 1968, le Dr Sadler suggère que 30 000 dollars U.S. par an seraient nécessaires. Si l'on envisage que le matériel pour l'échelle de temps doive en définitive appartenir entièrement au B.I.P.M., un budget supérieur à 30 000 dollars par an sera alors probablement nécessaire.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (P.T.B.), Braunschweig

Le Temps International (TI) doit être calculé à partir des différentes échelles de temps qui y contribuent. Le principe de la méthode est le suivant :

Les laboratoires qui conservent le temps et qui désirent contribuer à TI ou désirent connaître TI doivent mesurer le temps (instant, date) d'événements spécifiques, observables dans différents laboratoires, et exprimer les résultats dans leur échelle de temps. Les événements en question peuvent être :

- impulsions de Loran-C,
- impulsions du système anti-collision (à l'avenir),
- impulsions de télévision,
- phases des ondes myriamétriques et kilométriques,
- signaux horaires, par exemple d'horloges transportables.

On admet que par un moyen ou un autre (horloges transportables par exemple) on connaît la durée de propagation entre l'instant où l'événement survient et l'instant de réception au laboratoire.

Ensuite, les laboratoires envoient les résultats de leurs mesures, par correspondance ou par téléscripteur, à une "équipe de calcul" (qui travaille sous les auspices du B.I.P.M./C.I.P.M.) et qui détermine une moyenne pondérée (TI) selon les directives données par un Comité Consultatif du C.I.P.M.

Après que l'équipe a renvoyé au laboratoire (par correspondance ou par téléscripteur) la différence calculée entre TI et l'échelle de temps individuelle du laboratoire, TI se trouve disponible dans ce laboratoire qui conserve le temps et peut être ainsi communiqué aux utilisateurs.

De ce plan il résulte que :

1° Il n'est pas nécessaire d'établir TI au sens de le mettre en oeuvre dans une sorte de "centre horaire".

L'établissement et la conservation sont assurés par les laboratoires qui gardent le temps, en liaison avec l'équipe de calcul. L'équipe devra avoir accès à un ordinateur.

2° En principe, l'équipe de calcul n'a besoin d'aucun matériel technique (horloges, récepteurs, émetteurs).

a) Nous pensons que le travail de l'équipe n'est

pas de produire une échelle de temps supplémentaire.

b) L'équipe ne devra faire aucune recherche dans le domaine du temps ou des étalons de fréquence.

c) En ce qui concerne le problème de distribution, nous pensons qu'il n'est pas nécessaire que l'équipe de calcul de TI émette des signaux horaires ou des fréquences étalons.

A notre avis, c'est le rôle des laboratoires responsables de la garde du temps dans les différents pays d'obtenir et de distribuer TI avec la précision qui est considérée comme souhaitable dans leur pays. Une équipe de calcul sans matériel technique correspond à l'une des solutions les moins onéreuses. Si l'équipe disposait de (deux) horloges atomiques et d'ensembles récepteurs, cela lui permettrait d'acquérir une expérience pratique des problèmes en jeu et d'effectuer des interpolations et des extrapolations du temps. La qualité des horloges utilisées à cet effet n'a pas besoin d'être très élevée, car pratiquement l'échelle de temps de l'équipe s'élimine complètement du fait qu'elle sert seulement à former des différences entre échelles de temps.

Pour avoir une idée du personnel nécessaire, on pourrait demander au B.I.H. combien de personnes travaillent actuellement pour évaluer TA(BIH), y compris les publications (ayant trait au temps atomique) et la correspondance.

AUTRES LABORATOIRES

Les laboratoires suivants : Conseil National de Recherches, Ottawa, National Physical Laboratory, Teddington, Laboratoire japonais, U.S. Coast Guard, Washington, Observatoire de Neuchâtel, Instituto y Observatorio de Marina, San Fernando, ont étudié la question 4a avec la question 4b (voir ci-après).

QUESTION 46

Lorsque le Comité International des Poids et Mesures présente à la Conférence Générale un programme de travail et les contributions financières correspondantes, il est entendu que l'exécution du programme sera confiée au Bureau International des Poids et Mesures, sous la direction et la surveillance exclusives du Comité International, conformément à l'Article 3 de la Convention du Mètre. Or, en ce moment, c'est le Bureau International de l'Heure, sous l'autorité de la Fédération des Services permanents d'Astronomie et de Géophysique (F.A.G.S.), qui est reconnu compétent pour s'occuper, non seulement du Temps Universel qui est astronomique, mais encore du Temps Atomique, et du Temps Universel Coordonné.

Pouvez-vous proposer un programme d'attribution des tâches, à court terme et à long terme, entre le B.I.H. et le B.I.P.M., relativement à l'établissement et au maintien d'une échelle de temps internationale ?

BUREAU INTERNATIONAL DE L'HEURE (B.I.H.), Paris
et BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES (B.I.P.M.)

Des propositions à long terme nous semblent prématurées pour les raisons suivantes.

a) On ne connaît pas encore suffisamment bien quels seront les utilisateurs d'une échelle atomique internationale, en astronomie, en physique, dans les applications techniques, ni quels seront leurs besoins.

b) Même dans sa tâche concernant le temps universel, le B.I.H. devra sans doute prochainement considérer non seulement les observations astronomiques, mais encore et surtout les résultats de techniques plus récentes, telles que les mesures de distance par radar-laser, qui précisent déjà, par exemple, la position de l'axe de rotation de la Terre. Une évolution des méthodes de travail du B.I.H. est donc à prévoir, et cette évolution pourrait faire intervenir le temps atomique.

c) On ne sait pas encore s'il sera désirable de séparer à l'avenir les tâches du B.I.H. concernant le temps universel et les tâches concernant le temps atomique. Il nous semble certain que cette séparation serait néfaste pour le moment.

Nos propositions se limitent donc aux trois ou quatre prochaines années, pendant lesquelles les besoins et les moyens de satisfaire ces besoins apparaîtront sans doute.

Si la Conférence Générale des Poids et Mesures demande au C.I.P.M. de s'occuper de l'échelle de temps atomique international, les actions à envisager sont à notre avis les suivantes.

1° Reconnaître le travail déjà accompli par le B.I.H., et prier le B.I.H. de continuer ce travail.

2° Demander aux Gouvernements des États qui participent à la Convention du Mètre de prendre à leur charge les frais de rédaction des rapports et de leur publication ; c'est en effet par une diffusion rapide de ses rapports périodiques que le B.I.H. fera connaître aux utilisateurs l'échelle de temps atomique international. La dépense annuelle correspondante serait de l'ordre de 6 000 à 10 000 dollars.

3° Demander à ces mêmes Gouvernements de faire en sorte que les organismes nationaux donnent au B.I.H. l'aide matérielle et morale qui lui est nécessaire pour accomplir son travail, comme cela s'est fait spontanément jusqu'à présent.

4° Garantir une représentation réciproque dans les comités de direction du B.I.H. et du B.I.P.M. par un échange de lettres entre les présidents de ces comités.

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES (N.R.C.), Ottawa

Actuellement, le B.I.H. conserve une échelle de temps atomique, TUC, fondée sur la moyenne d'un certain nombre d'échelles de temps atomique indépendantes ou partiellement coordonnées, TUC(i). Il peut être nécessaire de modifier quelque peu le mode d'obtention de TUC à partir de TUC(1), mais puisque le B.I.H. possède maintenant le moyen de produire TUC, le mieux est de continuer à appliquer un système identique dans son principe.

En ce qui concerne la diffusion, TUC pourrait être transmis à partir de toutes les stations existantes et les

mesures de TUC—TUC(i) faites par chaque laboratoire participant (i), pourraient être communiquées au B.I.H. comme elles le sont actuellement, au moyen du Loran-C ou éventuellement d'autres systèmes comparables.

Le coût d'un tel système serait le même que maintenant et il devrait être possible de continuer le financement actuel.

Des relations étroites devront être entretenues entre le B.I.P.M. et le B.I.H. pour s'assurer que TUC, tel qu'il est produit par le B.I.H., demeure le meilleur que l'on puisse obtenir au fur et à mesure que se développent des techniques nouvelles et de nouveaux principes de mesure du temps, qui sont fondamentalement sous la responsabilité du B.I.P.M.

Si l'on estime souhaitable ou nécessaire de fournir au B.I.H. un budget séparé pour améliorer les services ou pour répartir les charges, le Canada envisagera favorablement d'y participer.

A. Propositions

1. En raison des connaissances techniques actuelles et de la relation étroite continue entre le temps atomique et le temps astronomique, le B.I.H. doit demeurer responsable du calcul et de la diffusion, mais non de la définition de l'Échelle de Temps Atomique International.

2. La liaison étroite nécessaire entre le B.I.H. et le C.I.P.M./B.I.P.M. doit être officialisée de telle sorte que la C.G.P.M./C.I.P.M., avec l'aide du C.C.D.S., définisse l'Échelle de Temps Atomique International. Entre autres tâches, il faudra définir la façon de pondérer les échelles individuelles de temps, le moyen de les combiner pour obtenir l'échelle la plus précise en tenant compte à la fois de la valeur de l'unité et de l'uniformité, et les techniques de mesure appropriées.

3. De telles propositions n'entraîneraient pas l'établissement de nouvelles installations de laboratoire au B.I.H. ni au B.I.P.M., mais pourraient nécessiter un accroissement de personnel pour la réduction des données. Tout accroissement des dépenses serait supporté par le C.I.P.M./B.I.P.M.

B. Commentaires

Donner une définition n'oblige en aucune façon le C.I.P.M. ou le B.I.P.M. à installer un équipement permettant une réalisation physique de l'échelle ainsi définie (voir le cas de l'ampère). La mise en pratique d'une définition quelle qu'elle soit peut être confiée aux laboratoires nationaux ou à tout autre organisme convenable, de préférence un organisme international.

Dans le cas de l'échelle de temps, il pourra être nécessaire d'apporter dans le futur de petites améliorations à la définition pour tenir compte de la précision et de l'exactitude plus grandes qui deviendront possibles ; ces améliorations, correctement appliquées, permettront un accroissement de l'uniformité de l'échelle. On pense que ces améliorations consisteront en une série d'approximations **successives** à l'intérieur de tolérances plus étroites qui n'infirmes pas les mesures antérieures faites avec une tolérance plus grande. On a un exemple de cette méthode avec la seconde atomique actuelle que l'on peut considérer comme étant à l'intérieur des limites de la réalisation pratique de la seconde des éphémérides.

Si l'on veut, la C.G.P.M. pourrait dès octobre 1971 définir une échelle de temps atomique utilisable sur le plan international. Elle pourrait désigner une organisation extérieure, pour réaliser ou établir l'échelle. Étant donné l'existence antérieure et continue d'échelles de grande précision largement disponibles, on pourrait considérer comme suffisant de continuer la pratique actuelle consistant à indiquer les corrections à apporter à ces échelles.

Préjugeant de l'action que la C.G.P.M. pourra exercer dans ce domaine, le C.I.P.M. pourrait, d'après les avis du C.C.D.S., demander au B.I.H. de poursuivre son travail actuel de maintien d'une échelle moyenne de temps atomique selon les procédés exposés dans le document CCDS/70-5. Cela sanctionnerait la poursuite d'un travail qui est accepté par toutes les parties concernées, permettrait d'exprimer à quel point toutes ces parties font confiance au personnel et au fonctionnement du B.I.H., et assurerait la continuité du système existant.

A la suite d'une résolution de la C.G.P.M. sur une échelle de temps atomique, le C.I.P.M. pourrait inviter le B.I.H. à être son mandataire pour établir l'échelle moyenne et diffuser le résultat au B.I.P.M. et à tous les laboratoires intéressés contribuant à l'échelle moyenne ou désireux d'y contribuer ultérieurement. Il conviendrait également que le C.I.P.M. accorde une petite subvention au B.I.H. pour la diffusion des informations par courrier ou par tout autre moyen. On ne considère pas souhaitable que le C.I.P.M. installe un autre laboratoire pour le temps.

Au fur et à mesure que l'on acquerra de l'expérience dans le fonctionnement et l'utilisation de cette échelle moyenne, on pourra éventuellement introduire des changements dans les règles d'élaboration de l'échelle. Ces changements devraient d'abord être discutés et recommandés par le C.C.D.S., ou un groupe de travail de ce Comité, publiés par le C.I.P.M. dûment habilité par la C.G.P.M., puis mis en application par le B.I.H.

Sans préjuger des décisions que pourrait prendre le C.C.D.S. en juin 1970, le B.I.H. a donné son accord pour fournir les informations TU—TA en conformité avec les accords internationaux que les administrations nationales ont conclus à New Delhi en février 1970 au cours de l'Assemblée Plénière du C.C.I.R. Il en résulte que le B.I.H. conserve une échelle de temps atomique appropriée. Toute autre proposition tendant à répéter cet effort ailleurs serait malavisée du point de vue financier et constituerait un gaspillage d'effort scientifique.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS (N.B.S.), Boulder

Il est exact qu'aux termes de l'article 3 de la Convention du Mètre, le B.I.P.M. se trouve sous la direction et la supervision exclusives du C.I.P.M. Toutefois, l'article 3 ne prévoit pas que les programmes financés par le C.I.P.M. soient exclusivement confiés au B.I.P.M. Nous n'avons rien trouvé dans la Convention du Mètre qui limite l'exécution d'un tel programme au B.I.P.M. De plus, nous n'avons connaissance d'aucun accord tacite qui limite dans

ce sens l'action du C.I.P.M.

Il est évident que si l'étalon de temps devenait l'étalon primaire d'autres grandeurs (par exemple longueur, potentiel électrique ou température), les crédits nécessaires qu'il faudrait justifier devant la C.G.P.M. seraient nettement plus importants. Si l'on ne perd pas cela de vue, une façon raisonnable de résoudre le problème maintenant est de subventionner le travail actuel du B.I.H. pour la mise au point d'une échelle de temps atomique. Deux possibilités raisonnables s'offrent :

1° Le C.I.P.M. pourrait passer un accord avec le B.I.H. pour établir une échelle de temps atomique. Il serait entendu que le matériel utilisé appartiendrait au B.I.P.M. et pourrait lui revenir si, en fait, l'étalon de fréquence devient l'étalon primaire d'autres grandeurs ou si le B.I.P.M. venait à avoir besoin de ce matériel.

2° Le directeur du B.I.H. pourrait en même temps faire partie du B.I.P.M. en étant chargé du temps atomique et de la direction du programme du B.I.P.M. dans ce domaine. Dans ce cas également une partie du matériel serait la propriété du B.I.P.M..

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (N.P.L.), Teddington

Le programme futur pour une échelle atomique internationale doit être fondé sur la continuation et l'extension du travail actuel du B.I.H. L'établissement et le maintien de l'échelle dépendent de la participation des laboratoires qui fournissent les données, tandis que les différences de temps entre TAI et des horloges sélectionnées peuvent être diffusées aussi fréquemment qu'il est nécessaire, par exemple à des intervalles d'une semaine. Actuellement, le B.I.H. reçoit une aide importante d'autres organismes, en particulier de l'U.S. Naval Observatory, sous forme de prêts d'appareils et aussi grâce aux comparaisons qui sont effectuées périodiquement au moyen d'horloges voyageuses. La question du financement des travaux futurs dépendra dans une certaine mesure de la continuation ou non de ces services. Dans l'affirmative, il semblerait qu'un budget annuel de 100 000 dollars U.S. suffirait à subvenir aux besoins du

programme de TUI. Le premier travail de ce programme serait la réduction et le collationnement des observations et la publication des valeurs de différence de temps, c'est-à-dire l'établissement et le maintien d'une "horloge sur papier". Les étalons matériels ne sont pas essentiels pour ce travail ; toutefois, le budget proposé tiendrait compte de l'acquisition par étapes de deux étalons Hewlett-Packard, des récepteurs connexes et d'unités périphériques si l'on désire obtenir une expérience directe des limitations d'appareils de ce genre, indépendamment des autres laboratoires.

En établissant et en maintenant avec succès l'échelle TA actuelle, le B.I.H. a acquis des connaissances approfondies dans ce domaine. Il semble donc tout à fait souhaitable de trouver un moyen pour associer le B.I.H. au B.I.P.M. dans la poursuite de ce travail. Il y aura inévitablement une association assez étroite entre l'échelle de temps astronomique et l'échelle de temps atomique. Le C.C.I.R. a recommandé que toutes les émissions primaires de signaux horaires transmettent une information codée donnant la différence entre TAS et l'une des formes de TU. Il dépendra du B.I.H. que ce service fournisse à la fois l'échelle de base TA et l'échelle astronomique appropriée, vraisemblablement TUI. Des exemples d'applications possibles nécessitant des échelles de temps précises sont, en astronomie, la détermination des variations dans les signaux des pulsars par rapport à une référence atomique et, en géophysique, l'étude des mouvements importants de la croûte terrestre en utilisant la différence de la distance Terre-Lune, telle qu'elle est déterminée par des mesures de distance (temps) par laser en des lieux différents.

La solution la plus satisfaisante pour le futur immédiat semblerait être le maintien de l'organisation existante du B.I.H. avec une aide du B.I.P.M. sous forme de moyens financiers, d'appareils ou de personnel, pour ce qui concerne ses travaux sur l'échelle de temps atomique international.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (P.T.B.), Braunschweig

La P.T.B. est bien d'avis que le laboratoire (l'équipe) calculant TI doit travailler sous les auspices du B.I.P.M./C.I.P.M. La P.T.B. a exprimé ce point de vue en plusieurs occasions (voir par exemple⁽¹⁹⁾). Nous pensons que le B.I.H. pourrait être scindé en deux parties, l'une s'occupant du temps astronomique et l'autre du temps atomique.

Comme TA et TU sont obtenus selon des méthodes entièrement différentes, il semble logique et possible de séparer les tâches du B.I.H. La partie du B.I.H. s'occupant du temps atomique pourrait alors travailler sous les auspices du B.I.P.M./C.I.P.M. La P.T.B. souhaite que cette solution puisse être mise en oeuvre.

Il y a peut-être des difficultés que nous ne connaissons pas. Dans ce cas, on pourrait envisager, pour calculer TI, de trouver ou de créer un autre laboratoire (équipe) désireux de travailler sous les auspices du B.I.P.M./C.I.P.M.

On doit au moins mentionner que toutes les données (résultats des comparaisons de temps) et tout le matériel nécessaire ou utile pour l'évaluation d'une Échelle de Temps International sont disponibles dans la plupart des laboratoires nationaux pour les travaux sur leur propre échelle de temps. Ainsi, en principe, ajouter à un laboratoire de ce type une équipe chargée uniquement du travail de calcul réduirait le coût de ce travail à un minimum puisque l'on n'aurait besoin d'aucun matériel complémentaire.

OBSERVATOIRE DE NEUCHÂTEL

L'avènement de l'heure atomique a relégué au second plan l'activité du B.I.H. dans le domaine du temps astronomique. Le travail dans ce domaine va encore diminuer d'importance lors de l'abandon généralisé du système TUC. Nous nous bornerons ci-après à l'activité du B.I.H. dans le domaine des échelles atomiques de temps. Les tâches du B.I.H. dans ce secteur peuvent se résumer en trois points :

1° Fixer les exigences pour les étalons participant à la formation du temps international, en particulier fixer la façon détaillée avec laquelle le B.I.H. désire être informé au sujet des caractéristiques et des modes d'exploitation des étalons ; établir le mode de calcul du temps atomique international, en particulier les facteurs de pondération par lesquels les étalons de chaque institution sont affectés.

2° Indiquer les méthodes praticables pour la comparaison des étalons des différentes institutions ; indiquer le mode par lequel les résultats de comparaison doivent être communiqués au B.I.H. ; collaborer à la mise au point de nouvelles méthodes de comparaison ; coordonner les comparaisons.

3° Publication des résultats.

Pour la partie non astronomique de son travail, le B.I.H. doit pouvoir disposer d'un apport indépendant de l'Observatoire de Paris. Cet apport extérieur doit couvrir les dépenses pour le personnel, les locaux, le calcul et la publication du temps atomique.

Cet apport extérieur doit être lié aux conditions explicites suivantes :

a) L'Observatoire de Paris s'engage à maintenir au B.I.H. un service horaire national complet avec étalons atomiques, installations de réception de signaux, personnel scientifique.

b) Les frais pour le maintien de ce service horaire sont couverts entièrement par l'Observatoire de Paris. Cette symbiose du B.I.H. avec un service horaire complet doit garantir au B.I.H. le maintien d'une haute compétence technique.

Les ressources du B.I.H. proviendraient donc de trois instances différentes :

- 1° Le B.I.P.M. pour l'établissement de l'heure internationale.
- 2° L'Observatoire de Paris pour le maintien et l'exploitation du service horaire.
- 3° La F.A.G.S. pour la coordination des mesures du temps astronomique.

Du mode de financement découle l'attribution du droit de regard. Le B.I.P.M. acquiert par sa contribution le droit de surveillance sur le travail en relation avec l'heure internationale. Pour exercer cette surveillance, il convient que le C.I.P.M. nomme, en remplacement du C.C.D.S., une commission spéciale dont le mode de travail et les attributions découlent d'un règlement à élaborer.

INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE MARINA, San Fernando

Il n'y a pas lieu de différer la définition d'une échelle internationale atomique, car la datation la meilleure possible des phénomènes observables est une nécessité non seulement pour l'avenir mais aussi pour le présent. L'échelle atomique du B.I.H. dans son état actuel peut, dès maintenant, constituer l'échelle internationale souhaitée. En fait, il est préférable d'avoir, comme référence universelle, une échelle uniforme, bien qu'elle ne soit pas fidèle à la définition de la seconde (10^{-13}) que de n'en avoir aucune ou bien d'en avoir plusieurs. Cette échelle, bénéficiant avec le temps de moyens de plus en plus raffinés, pourrait être perfectionnée progressivement ; toute amélioration à introduire dans l'échelle internationale pourrait être préalablement discutée et décidée par un comité consultatif permanent au sein du B.I.P.M. et qui serait officiellement en liaison avec le B.I.H.

AUTRES LABORATOIRES

La Commission Nationale de l'Heure, Paris, est nettement favorable au principe d'une répartition des tâches entre le B.I.H. et le B.I.P.M.

Les Laboratoires japonais estiment préférable que ce soit le C.I.P.M. qui donne la définition du temps atomique international ; toutefois, pour des raisons économiques et pratiques, seul le B.I.H. devrait être chargé de l'établissement, de la conservation et de la diffusion de ce temps.

Le Royal Greenwich Observatory, Hailsham, n'estime pas nécessaire, comme certains l'ont suggéré, que le travail

qu'effectue actuellement le B.I.H. soit séparé en deux parties, l'une pour TU et l'autre pour TA.

L'U.S. Coast Guard, Washington, considère que le B.I.H. est tout à fait compétent pour établir, maintenir et diffuser une échelle de temps atomique international, pourvu qu'il soit aidé. Si l'acquisition d'appareillage devient nécessaire, l'U.S.C.G. pourra fournir un ou peut-être deux étalons à césium à titre de prêt de longue durée.

QUESTION 5

Quelle est votre opinion sur la façon de résoudre pratiquement les problèmes que pose la coexistence du Temps Atomique, du Temps Universel (position angulaire de la Terre), et du Temps Universel Coordonné utilisé pour la diffusion de plusieurs signaux horaires ?

BUREAU DES LONGITUDES, Paris

Bien que nous n'ayons pas d'expérience pratique du problème, il nous semble que la méthode récemment employée en République Démocratique Allemande, qui consiste à dédoubler le n -ième top après la minute ronde pour indiquer que la différence entre le temps diffusé et le temps universel est égale à $0,02 n$ secondes, est à la fois simple et suffisamment précise pour les besoins liés à une accessibilité immédiate (navigation par exemple).

COMMISSION NATIONALE DE L'HEURE (C.N.H.), Paris

Les problèmes relatifs à la transmission de signaux horaires en divers temps sont à l'étude. Tout en souhaitant pour l'avenir la transmission de signaux en Temps Atomique pur, la C.N.H. estime acceptable à titre transitoire le système préconisé par le C.C.I.R., com-

portant un ajustage des signaux sur le Temps Universel coordonné au moyen de sauts de 1 s.

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES (N.R.C.), Ottawa

Le C.C.I.R. a récemment décidé de diffuser seulement TA avec sauts après janvier 1972. On suppose que les signaux émis seront coordonnés par le B.I.H. Des systèmes pratiques ont été proposés pour fournir les différences TU2-TUC, et comme dans l'application de l'astronomie à la géodésie et à la navigation on n'a besoin de ces corrections qu'au dixième de seconde, une extrapolation sous forme de tables peut être faite pour quelques mois et incorporée aux émissions normales de temps dans un signal codé ou parlé. Bien que l'on propose à l'heure actuelle des sauts de 1 seconde, des sauts de 10 ou 100 secondes semblent en principe tout à fait acceptables ; cela serait même préférable pour certaines activités commerciales telles que les réseaux de distribution d'énergie électrique.

ISTITUTO ELETTROTECNICO NAZIONALE (I.E.N.), Turin

L'I.E.N. appuie la décision prise par le C.C.I.R. en 1969 d'émettre prochainement les signaux horaires sans décalage et avec des sauts discrets pour maintenir un écart moindre que 0,5 s entre les signaux TUC et TU.

Cet écart pourrait être tabulé quelques mois auparavant, avec une résolution de 100 ms, suffisante pour la plupart des usagers. Ou bien on pourrait donner cette information par radio dans la même émission étalon.

L'I.E.N. est en train de suivre la deuxième voie, avec son émetteur IBF qui est bien reçu dans toute l'Europe. Les détails techniques seront communiqués aux laboratoires intéressés.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS (N.B.S.), Boulder

Les problèmes posés par la coexistence de TA, TU et TUC et leur diffusion par radio sont du ressort de la

Commission d'Études VII du C.C.I.R. Il semble que l'échelle de temps atomique international pourrait continuer à être correctement diffusée par la publication périodique des relations entre les principaux signaux horaires et l'échelle internationale.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (N.P.L.), Teddington

Le compromis du système TAS (1s) dont nous avons déjà parlé semble satisfaire à la fois les besoins pour TA et pour TU, par le moyen d'informations codées. On n'a pas l'intention actuellement d'émettre des signaux TA, mais si on l'envisageait il faudrait alors réexaminer la situation.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (P.T.B.), Braunschweig

Le système TUC ne peut plus être admis en République Fédérale Allemande comme système de temps officiel, puisque l'unité de cette échelle n'a pas une relation fixe avec la seconde (légale). Une nouvelle loi allemande sur les unités de mesure interdit un cas de ce genre. Par conséquent, l'émetteur allemand DCF 77 émet uniquement des signaux horaires conformes au système TAS (sauts de 0,2 s) depuis le 1^{er} avril 1970:

En relation avec les travaux du Groupe International de Travail VII/1 du C.C.I.R., une enquête a été conduite en République Fédérale Allemande sur l'avis des utilisateurs quant au système de temps qu'ils désireraient dans l'avenir et en particulier sur l'utilité de TAS (1 s) qui était proposé (Temps Atomique à Sauts de 1 s pour garder une bonne concordance avec TU). On connaît les résultats de cette enquête⁽¹⁷⁾⁽²⁷⁾ : le système TAS (1 s) est considéré comme le meilleur "système de compromis pour le temps". La plupart des utilisateurs pensent toutefois que l'existence parallèle et la distribution indépendante de TA et de TU seraient profitables. Des propositions ont été faites pour éviter le danger de confusion. L'administration de la République Fédérale Allemande a, dans un document, proposé au

(27) C.C.I.R., Document VII/98, 18 Sept. 1969.

C.C.I.R. d'établir un Groupe international de travail du C.C.I.R./VII chargé d'étudier les problèmes de "TA et TU en parallèle".

En 1969, à Genève, l'administration allemande a accepté de retarder l'étude du document allemand jusqu'à ce que le système TAS (1 s) soit introduit par le C.C.I.R.

Le point de vue de la P.T.B. est le suivant :

1. Le système TUC doit être aboli.

2. Le système TAS (1 s) doit être introduit comme il en a été décidé par le C.C.I.R. à New Delhi, au début de 1970.

3. Le but final est l'introduction internationale d'une échelle de temps atomique sans sauts ni décalages de fréquence (TA) pour l'emploi général (légal) comme TI. Nous pensons que la différence entre le système TUC et TA est en fait trop importante pour être surmontée en une fois. Il semble convenable de passer de TUC à TAS (1 s), puis plus tard à TA.

Nous préconisons la méthode suivante :

1° Le C.I.P.M. (la C.G.P.M.) doit introduire officiellement le système TAS (1 s) comme "Temps International" (TI) par une résolution.

2° Le C.I.P.M. (la C.G.P.M.) doit demander aux organismes qui diffusent ou utilisent TU de résoudre le problème de l'information des utilisateurs de TU afin de rendre possible une future Échelle de temps international sans sauts.

Il va de soi qu'après son introduction officielle par la C.G.P.M., TI sera le temps civil. Il ne sera pas nécessaire de fournir TU au public.

Au cas où TAS (1 s) deviendrait TI, la définition de TI devrait mentionner les sauts de 1 s. Nous recommandons que le C.I.P.M. (la C.G.P.M.) donne pouvoir au B.I.P.M. pour effectuer ces sauts chaque fois que c'est nécessaire.

Il reste à discuter pour savoir si le code envisagé, donnant la différence $TU - TI$, fait partie de TI et doit également être défini par le C.I.P.M. (la C.G.P.M.). Ce n'est pas, à notre avis, une question du ressort du C.I.P.M.

ROYAL GREENWICH OBSERVATORY (R.G.O.), Hailsham

Le R.G.O. est d'accord pour penser que TA et TU seront tous les deux nécessaires, bien qu'il ne soit pas certain que TU2 continue de l'être. Même si TUC (décalage et sauts de 0,1 s) n'est plus émis par radio, il peut encore s'avérer utile dans les établissements qui conservent le temps.

Le C.C.I.R. a recommandé un système commun pour diffuser TA et TU par radio. Les dispositions détaillées sont à l'étude par le Groupe International de Travail VII/1 du C.C.I.R. En ce qui concerne la nomenclature, le C.C.I.R. recommande TAS pour les émissions par radio. Toutefois, différentes autorités ont proposé de retenir le nom TUC : une autre proposition pourrait être TUA. On a largement utilisé ces deux expressions pour différents systèmes. Toutefois il y a des arguments pour inclure l'expression "TU" dans le nom du système proposé pour les émissions de signaux horaires par radio.

OBSERVATOIRE DE NEUCHÂTEL

A la lumière des discussions qui ont eu lieu précédemment au sein de l'U.R.S.I., de l'U.A.I., du C.C.I.R. et du C.C.D.S., on peut affirmer qu'un système unique et universel pour l'émission de signaux horaires et de fréquences étalons doit découler de recommandations émanant du C.I.P.M. En effet, on voit difficilement cette tâche confiée à un autre organisme, vu que cette tâche découle d'une façon directe de la définition de la seconde. En pratique, le C.I.P.M. doit revendiquer la responsabilité pour la coordination des signaux horaires et confier à son comité consultatif la tâche d'élaborer des recommandations à l'intention du C.I.P.M.

Nous proposons par conséquent que le C.C.D.S. engage une discussion sur les points de vue actuels des responsables des différents pays. Puisqu'il semble que la date du 1^{er} janvier 1972 pour l'abandon du système TUC soit universellement envisagée, le seul point en litige reste l'ampleur des sauts d'état (1 seconde, 1 minute ou plus).

Il serait utile de dresser un catalogue des opinions et arguments à ce sujet.

INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE MARINA, San Fernando

La coexistence TA-TU doit être évitée dans l'avenir. L'importance actuelle de TU (position angulaire de la Terre) comme argument des éphémérides est due principalement au fait que ce temps est transmis à l'utilisateur (navigateur, géodésien) avec l'approximation dont il a besoin et de façon commode, continue et prête à l'emploi.

Le problème à traiter, en consultant les organismes concernés, serait de remplacer, dans certaines Éphémérides, TU par le temps atomique pur comme argument de ces Éphémérides, et aussi de remplacer l'information actuellement diffusée sous forme de signaux horaires par une autre information, diffusée par radio ou par tout autre moyen, permettant de tenir compte des irrégularités de la rotation de la Terre, inconnues au moment de l'établissement des Éphémérides.

AUTRES LABORATOIRES

Les Laboratoires japonais considèrent que la nouvelle méthode recommandée par le C.C.I.R. semble tout à fait convenable pour le moment.

L'U.S. Coast Guard, Washington, suppose que les dispositions des recommandations du C.C.I.R. sur ce sujet traiteront correctement ce problème et que le B.I.H. diffusera périodiquement des informations sur les émissions étalons de temps en rapport avec l'échelle de temps atomique internationale.

ANNEXE S 3

Rapport au B.I.P.M. pour la 5^e session du C.C.D.S.

Par M. KALAU

Deutsches Amt für Messwesen und Warenprüfung (Allemagne)

Bien que le D.A.M.W. n'ait pas encore la possibilité de réaliser la seconde sur la base de sa définition d'octobre 1967 ni d'établir à partir d'elle une échelle de temps, nous exposons ci-après notre point de vue sur les principaux problèmes inscrits à l'ordre du jour de la 5^e session (juin 1970) du C.C.D.S.

Comme conséquence logique de la nouvelle définition de la seconde, il serait désirable de définir, au moyen de phénomènes atomiques, une échelle de temps qui tienne compte entièrement de cette définition physique. Notre opinion est que l'échelle moyenne garantie jusqu'à présent par le Bureau International de l'Heure est suffisante pour toutes les institutions intéressées qui ont besoin d'un système de temps dépendant de la rotation de la Terre. Cette échelle devrait satisfaire aussi les besoins futurs de ces institutions.

Les faits qui conduisirent à la définition atomique de la seconde rendent possible la définition d'une échelle de temps qui, selon nos connaissances actuelles, peut être considérée comme mesure pour le déroulement de

tous les phénomènes physiques dans les sphères de même potentiel gravitationnel. A notre avis, une échelle de temps atomique international, échelle qui doit être définie et qui tienne compte entièrement des aspects physiques de la définition atomique de la seconde, doit satisfaire les exigences suivantes :

- 1° La durée de la seconde constituant la base de l'échelle de temps doit correspondre à la définition de la seconde.
- 2° Il ne doit pas être permis de changer les phases des impulsions de temps qui servent à l'adaptation de l'échelle de temps atomique à d'autres échelles de temps.
- 3° On doit essayer de s'affranchir des termes empruntés aux systèmes de temps dépendant de la rotation de la Terre ainsi qu'à d'autres systèmes de temps issus de l'astronomie parce que, du point de vue physique, il n'y a aucune raison d'employer ces termes pour le déroulement des phénomènes atomiques qui constituent la base de la définition.

Comme solution la plus simple du point de vue physique, solution qui remplit ces conditions, nous recommandons de définir l'échelle de temps atomique international ainsi :

- 1° L'intervalle étalon de l'échelle de temps est la seconde telle qu'elle a été définie en octobre 1967.
- 2° Un instant conventionnel est fixé comme zéro de l'échelle de temps atomique international. Cet instant correspond au .. [date].. du décompte employé jusqu'à présent.
- 3° L'échelle de temps est établie en comptant par secondes, à partir de l'instant zéro.
- 4° Un instant quelconque rapporté à l'échelle de temps atomique international est caractérisé par l'indication en secondes du temps écoulé depuis le zéro de l'échelle.

L'influence du potentiel gravitationnel sur le déroulement de toute action physique résultant de la théorie de la relativité générale devrait être prise en considération en rapportant l'échelle de temps atomique international, dérivée de la seconde atomique, à un certain potentiel gravitationnel du champ de l'attraction terrestre. Les

variations du potentiel gravitationnel total, variations dues aux changements du potentiel des champs de l'attraction extraterrestre résultant des phénomènes astronomiques, ne devraient pas être prises en considération pour l'échelle de temps international parce qu'elles sont aussi, en moyenne, pratiquement les mêmes pour tous les lieux où le potentiel du champ de l'attraction terrestre est le même.

Pour des échelles de temps atomiques établies en des lieux où le potentiel du champ de l'attraction terrestre est différent, il faut, si la précision désirée l'exige, faire les corrections résultant de la théorie de la relativité générale pour le potentiel uniforme fixé. Il en est de même pour des échelles de temps établies en des lieux extraterrestres.

Les relations avec les échelles de temps dépendant de la rotation de la Terre devraient être établies par un "calendrier élargi". Ce calendrier relierait aux instants de l'échelle de temps atomique les instants correspondants des échelles de temps dépendant de la rotation de la Terre en indiquant la "date" en secondes, minutes, heures, jours, mois et années.

Des échelles de temps dépendant de la rotation de la Terre devraient rester en vigueur pour toutes les institutions intéressées et liées à de tels systèmes, y compris tous les utilisateurs du "temps civil".

Cette proposition correspond, à notre avis, aux besoins de tous les usagers possibles d'une échelle de temps absolument physique. Elle leur apporte en outre les avantages suivants :

- 1° L'intervalle de temps entre deux instants quelconques de l'échelle peut être déterminé au moyen de la simple différence entre les deux instants de l'échelle.
- 2° Par l'introduction d'une telle échelle de temps, les unités étrangères à ce système comme la minute, l'heure, etc., disparaîtront, ce qui rendra possible une cohérence encore plus grande du SI.
- 3° En raison seulement de la nature différente des échelles de temps atomiques et des échelles de temps dépendant de la rotation de la Terre, une confusion de ces deux types d'échelles par l'utilisateur est presque impossible.

La publication et la diffusion des deux échelles de temps qui, selon cette proposition, seront au moins nécessaires, à savoir l'échelle de temps atomique internationale et une échelle dépendant de la rotation de la Terre, devraient se faire en pratique au moyen d'un signal de temps donné conformément à une échelle de temps atomique à sauts de 1 seconde. La durée des intervalles de 1 seconde et la phase du signal de temps correspondent, dans ce cas, exactement à l'échelle de temps purement physique. L'identification des minutes sera, en revanche, ajustée à $\pm 0,5$ s à l'échelle de temps dépendant de la rotation de la Terre. D'autres informations relatives aux deux échelles de temps doivent être rendues possibles par l'indication de corrections. Il s'agit des indications suivantes :

- 1° Indication du nombre des sauts de 1 s de l'échelle de temps TAS comparé à celui de l'échelle de temps purement atomique au moyen de laquelle l'utilisateur de l'échelle de temps définie ci-dessus est à même de calculer la "date" d'un instant quelconque en secondes.
- 2° Indication de la situation de l'échelle de temps TAS comparée à l'échelle du temps universel TU1 avec une précision de 10 ou 20 ms, de manière qu'une indication de temps satisfaisant aux exigences soit assurée pour le service hors des laboratoires.

Pour l'emploi pratique nous recommandons de choisir une méthode comme celle qui est mise à l'épreuve depuis le 1^{er} février 1970 en République Démocratique Allemande par le poste émetteur de signaux horaires DIZ*.

Par ce moyen, on pourrait ainsi transmettre par exemple les corrections TAS-TU1 chaque minute et les corrections TAS-TA chaque heure juste.

Quant au programme de travail pour réaliser cette proposition il serait désirable, en tout cas, de tenir compte du fait que le B.I.H. effectue depuis de nombreuses

* Depuis le 1^{er} février 1970 à 9 h 45 TU, nous expérimentons une méthode pour indiquer dans nos émissions de signaux horaires la différence TU2 - temps d'émission.

Notre émetteur DIZ diffusera l'écart TU2-TUC selon le

années d'excellents travaux pour l'établissement des échelles de temps, travaux qui devront de toute façon être utilisés, tandis que le B.I.P.M. se trouverait en face de problèmes entièrement nouveaux. Pour cette raison, on devrait aussi confier au B.I.H. l'établissement et la matérialisation de toutes les échelles de temps. Une représentation du B.I.P.M. dans le B.I.H. doit néanmoins permettre de garantir que la direction et le contrôle de toutes les questions concernant l'échelle de temps atomique internationale seront assurées uniquement par le C.I.P.M., conformément à l'article 3 de la Convention du Mètre.

Quoique notre proposition dépasse, à de nombreux égards, le cadre des conventions en vigueur jusqu'ici et, pour cette raison, doive entraîner quelques problèmes, le C.I.P.M. et le C.C.D.S. devraient la considérer avec attention.

schéma suivant :

$TU2 - TUC = + n \cdot 20$ ms, si l'une des 25 premières secondes est marquée (n est le numéro de la seconde marquée)
ou $TU2 - TUC = - (60 - n) \cdot 20$ ms, si la seconde marquée occupe le rang 35 à 60.

A la seconde marquée correspondra une double impulsion.

Exemple



$$TU2 - TUC = + 2 \cdot 20 \text{ ms} = + 40 \text{ ms}$$



$$TU2 - TUC = - (60 - 60) \cdot 20 \text{ ms} = 0$$

ANNEXE S 4

Commentaires sur une échelle de temps atomique international

Par J. A. BARNES

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

I. COMMENTAIRES D'INTRODUCTION

L'intervalle de temps (dt) est l'un des concepts les plus fondamentaux de toute la science. En fait, de toutes les grandeurs physiques, la fréquence et l'intervalle de temps sont celles qui peuvent être mesurées avec l'exactitude et la précision les plus grandes. En soi, l'intervalle de temps est extrêmement important ; mais les autres branches de la science commencent à bénéficier des techniques acquises dans le domaine du temps et de la fréquence. C'est-à-dire que si l'on peut mettre au point un transducteur permettant de convertir d'une manière sûre un paramètre en une mesure de fréquence (ou d'intervalle de temps), on peut alors s'attendre à de nettes améliorations dans la précision (peut-être aussi dans l'exactitude) de la mesure. C'est pourquoi on voit aujourd'hui des mesures de longueur, de vitesse, de température, de champ magnétique et de potentiel électrique faire de plus en plus appel aux techniques de temps et de fréquence. Cela va des concepts fondamentaux, tels que l'utilisation de l'effet Josephson (c'est-à-dire des mesures de fréquence) comme étalon éven-

tuel de tension électrique, à des concepts plus courants, tels que des mesures de vitesse par radar dans l'application de la loi. Cela accroît le nombre des utilisateurs des techniques de temps et de fréquence et, éventuellement, risque d'entraîner des exigences discutables à cause de leur réputation de panacée.

Le développement des techniques de temps et de fréquence a permis les synchronisations d'horloges en des lieux éloignés, synchronisations qui tendent régulièrement vers une plus grande précision. L'emploi actuel ou possible de la synchronisation précise d'horloges intéresse la navigation, la prévention de collisions aériennes, l'interférométrie sur de longues distances, les systèmes de communications complexes, etc. A titre d'exemple d'exigences courantes, la National Aeronautics and Space Administration essaie couramment de synchroniser ses stations d'observation avec une tolérance de $\pm 5 \mu\text{s}$. Des efforts importants sont couramment faits pour mettre au point des systèmes de synchronisation à mieux que la microseconde.

Ce qui est symptomatique dans cette tendance, c'est que l'échelle courante de TUC donne de moins en moins satisfaction. En effet, une pression se fait sentir pour établir une nouvelle échelle de temps qui tiendrait davantage compte des possibilités de la synchronisation des stations et des désirs des physiciens, et tiendrait moins compte de la commodité pour les navigateurs et les astronomes. Il est toutefois évident que tout nouveau système de compromis doit satisfaire de façon correcte les besoins des astronomes et des navigateurs. A sa réunion au B.I.P.M. en octobre 1968, la "Commission préparatoire pour la coordination internationale des échelles de temps" (voir Annexe S 10) a recommandé au C.I.P.M. qu'une nouvelle échelle de temps soit établie. Depuis lors, d'autres organisations (C.C.I.R., U.R.S.I.) ont recommandé que le C.I.P.M. prenne une part active à l'établissement d'une échelle de temps atomique international.

Il existe en puissance une autre influence importante sur les techniques de temps et de fréquence : le lien entre l'étalon de longueur et l'étalon de fréquence et d'intervalle de temps. Il semble que le dispositif le plus

stable (quoique ce ne soit pas le plus exact) soit un laser stabilisé au moyen de l'absorption saturée dans le méthane[1]. Il s'est avéré que ce dispositif donne une stabilité surpassant même celle de l'oscillateur à cristal de quartz et du maser à hydrogène ; c'est un concurrent sérieux pour l'étalon de longueur. Les techniques de synthèse de fréquences ont permis pour le moment (15 janvier 1970) des mesures de fréquence jusqu'à 28 THz[2] ; au N.B.S. des travaux ont commencé pour mesurer directement la fréquence du méthane à 88 THz par rapport à celle de l'étalon à césium. Il est probable que la mesure de cette résonance du méthane sera achevée en 1970.

Lorsque la synthèse de fréquences à 88 THz sera possible, il est évident que bien des critères qui sont importants pour un étalon de longueur seront absolument les mêmes que pour un étalon de fréquence. On pourra ainsi avoir un seul et même étalon pour la fréquence, le temps et la longueur. Il est probable que pour l'exécitute, au moins dans les prochaines années - et peut-être davantage - c'est l'étalon à jet de césium qui prévaudra.

II. BUTS DE LA RÉUNION DU C.C.D.S.

Lorsque l'on envisage de nouveaux systèmes, tels qu'une échelle de temps atomique international, il faut conserver les buts bien présents à l'esprit.

1°. Il incombe au C.C.D.S. de fournir les conseils techniques et de recommander un financement pour l'échelle de temps atomique international. De plus, le C.C.D.S. doit émettre des recommandations pour ce qui est de la responsabilité de l'organisation.

2°. Je pense qu'il est essentiel que le B.I.P.M. soit effectivement l'organisation internationale particulièrement chargée de tous les étalons fondamentaux, et que tout ce qui sera décidé reflète ce désir. Il est possible (et même probable) que la longueur, la fréquence et le temps seront bientôt fondés sur un seul et même étalon. A plus longue échéance, il est possible que les unités de potentiel électrique et même de température soient finalement fondées sur ce même étalon. Il convient également d'envisa-

ger que le jet de césium puisse conserver sa position actuelle de dispositif le plus exact.

3°. Une échelle de temps atomique internationale doit être fondée sur l'unité SI (c'est-à-dire la seconde). L'échelle de temps la plus largement utilisée aujourd'hui (TU) n'utilise pas la seconde du SI comme unité de base. En effet, les étalons de temps (dans le sens de l'heure) sont en général différents des étalons de fréquence (et d'intervalle de temps). Je pense que ce serait une erreur profonde de séparer de nouveau, à cause des besoins d'uniformité d'une échelle de temps atomique, l'unité de base de l'échelle elle-même. Il est possible (et souhaitable) de mettre au point des méthodes de pondération qui optimiseront la stabilité de la fréquence et maintiendront en même temps l'unité de base proche de l'estimation courante la meilleure.

4°. On doit utiliser les capacités et les compétences disponibles de façon utile et efficace. En particulier, le B.I.H. et son directeur ont donné les preuves tangibles et marquantes d'une bonne compétence dans les domaines concernant la mesure du temps.

5°. Toute échelle de temps diffusée (par exemple un nouveau TUC) devrait probablement être coordonnée avec le Temps Universel. Il est certain que les astronomes ont eux aussi besoin d'une bonne échelle de temps (horloge).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BARGER (R.L.) and HALL (J.H.), Pressure shift and broadening of methane line at 3.39 micron studied by laser-saturated molecular absorption. Phys. Rev. Letters, 22, n° 1, Jan. 6, 1969.
- [2] EVENSON (K.M.), WELLS (J.S.) and MATARRESE (L.M.), Absolute frequency measurements of the CO₂ CW laser at 28 THz (10.6 μm). (à paraître).
- ESSEN (L.), The units of time and length. Nature, 180, 1957, pp. 137-138.
- SIMKIN (G.S.), Establishment of a single time and length standard. Translated from Izmeritelnaia Tekhnika, N° 10, 1968, pp. 6-10.

ANNEXE S 5

Commentaires sur l'utilisation du temps atomique

Par B. GUINOT

Bureau International de l'Heure

I. UTILITÉ D'UNE ÉCHELLE DE TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL

Je désignerai par TAI le temps atomique international.

On peut distinguer deux utilisations fondamentales d'une échelle de temps : 1° elle doit représenter le paramètre "temps" de la dynamique afin de permettre l'interprétation théorique de mesures ; 2° elle doit servir de base de synchronisation afin de permettre à tous d'assigner la même date à un événement.

A ces deux utilisations correspondent deux qualités, l'uniformité et l'accessibilité. L'uniformité est l'aptitude à représenter le temps de la dynamique ; elle peut être mesurée par la variation relative de la durée de l'unité de mesure de l'échelle de temps, tant que celle-ci sera en usage ; c'est, si l'on préfère, la stabilité à terme infini. L'accessibilité est un ensemble complexe de propriétés et elle sera représentée par les procédures, coûts et retards pour lire l'échelle à une précision donnée.

Juste avant l'apparition du temps atomique (1955), la base de synchronisation était le temps universel TU

déduit des observations de la rotation de la Terre.

L'accessibilité était immédiate à quelques 0,01 s par les signaux horaires ; à quelques 0,001 s près, elle demandait la centralisation des mesures astronomiques par le Bureau International de l'Heure (B.I.H.) et un délai d'environ un an. La base de temps uniforme était le temps des éphémérides TE, accessible après plusieurs années, par l'intermédiaire de TU, à une précision de l'ordre de 0,1 s et uniforme à 10^{-9} près environ.

J'ai rappelé ces nombres bien connus afin de les comparer à ce que permet le temps atomique à présent. Le temps atomique du B.I.H. est uniforme à quelques 10^{-13} près ; au plus haut degré de précision, il est accessible à quelques 0,1 μ s près sous forme de corrections à certaines horloges ou aux signaux de Loran-C, après un délai de un à deux mois (ce délai peut être réduit à deux semaines par l'emploi de moyens de communication plus coûteux que ceux utilisés en ce moment) ; à 1 ms près, il est accessible immédiatement par les signaux horaires coordonnés.

Parmi les besoins d'une échelle de temps qui me sont connus, je noterai les suivants :

1° L'interprétation des mouvements célestes de corps naturels ou non demande que les observations soient datées en temps uniforme ; le but du travail est de mettre en évidence des effets de plus en plus fins afin de découvrir des insuffisances de la théorie ou d'éprouver des modèles cosmogoniques ; la précision à l'observation limite la précision de lecture du temps, mais, comme les observations peuvent durer indéfiniment, l'uniformité requise croît sans limite ; on notera, par exemple, que pour assurer la reproductibilité d'un intervalle de 10 ans dont les extrémités sont datées à 0,1 ms près, l'uniformité doit être 4×10^{-13} . L'usage des temps astronomiques est manifestement insuffisant. Le temps atomique est le seul utilisé en recherche spatiale (le "temps" universel ne servant que d'indicateur de la position de la Terre autour de son axe) ; d'ores et déjà, il sert à interpoler et extrapoler le temps des éphémérides ; je ne vois aucune raison pour laquelle il ne pourra se substituer au temps des éphémérides comme argument de l'éphéméride des corps célestes naturels. Le temps

atomique est donc d'un intérêt primordial pour l'astronomie ; le caractère international de cette science exige qu'on utilise une unique échelle.

2° Les expériences de haute précision montées par les laboratoires de physique exigent, en général, qu'ils utilisent leur propre échelle de temps : il s'agit le plus souvent d'expériences de durée courte pour lesquelles la précision de lecture d'une échelle internationale est insuffisante. Une échelle de temps atomique diffusée peut cependant servir à étalonner des horloges de laboratoire, mais il importe de noter qu'elle n'est pas utilisée comme échelle puisqu'elle ne sert pas à dater ; de plus, son caractère international est alors superflu.

3° Il est souhaitable qu'il existe une échelle de temps acceptée par tous qui puisse servir à synchroniser les horloges depuis le niveau de précision de la vie courante jusqu'à celui permis par l'accessibilité de cette échelle. Pour des applications scientifiques et techniques, la précision requise est :

1000 à 100 μ s pour l'astrométrie classique ;

100 à 10 μ s pour assurer la simultanéité d'observations de corps célestes par laser et pour la triangulation spatiale ;

0,1 μ s pour des systèmes de navigation, de sécurité aérienne, de communications ;

1 ns ou mieux pour certaines applications de l'interférométrie à longue base sur radio-sources.

L'accessibilité de TAI (supposé obtenu par moyenne d'indications d'horloges étalons distribuées en plusieurs pays) n'étant pas immédiate, la possibilité de maintenir une synchronisation sur cette échelle est limitée par les défauts d'uniformité tant de l'échelle internationale que des horloges locales. Le seuil se situe à 1 μ s en ce moment. Passé ce seuil, les synchronisations doivent se développer sur leur propre système interne. Nous reviendrons dans le paragraphe III sur les rapports réciproques de TAI et des systèmes à synchronisation interne.

4° La seconde ayant une définition atomique, il est logique qu'une échelle de temps officielle soit construite à partir de cette seconde.

II. CORRECTIONS RELATIVISTES ; UNITÉ D'ÉCHELLE

A la demande des membres français du C.C.D.S., une note sur ce sujet a été rédigée par O. Costa de Beauregard (voir Annexe S 8). Nous discuterons ici de certains choix à faire, indépendamment des modalités de calcul qu'ils entraînent.

TAI doit être une échelle de temps-coordonnée. Afin d'éviter que l'unité de mesure de TAI soit trop différente de la seconde de temps propre des laboratoires terrestres, on pourrait rapporter TAI au niveau du géoïde ; il serait même plus correct de le rapporter à un point choisi de la Terre afin de permettre tous les raffinements théoriques (par exemple, effets de marées dont certains sont à période longue). Pour les laboratoires terrestres, les corrections de fréquence resteraient ainsi aussi petites que possible, mais déjà non négligeables. Il importe donc que la définition conventionnelle de TAI comme temps-coordonnée terrestre soit donnée dès maintenant. Les applications de ce temps à la mécanique céleste demanderont des corrections plus complexes et supérieures de plusieurs ordres de grandeur aux défauts d'uniformité ; il importe donc, là aussi, que la nature de TAI soit précisée. Notons, en outre, que seule une définition complète de TAI permet de comparer son unité de mesure à la seconde du SI.

Cela nous conduit au problème de l'exactitude de TAI : l'unité de mesure de cette échelle devrait être la seconde au lieu de référence choisi. J'ai expliqué (Rapport Annuel du B.I.H. pour 1969, p. 17) les raisons pour lesquelles j'ai donné la prépondérance au critère d'uniformité et j'ai montré qu'il y avait une certaine opposition avec le critère d'exactitude. Je ne vois aucun avantage à ce que l'unité de mesure de TAI suive les fluctuations des déterminations expérimentales de la seconde. Il me paraît plus convenable de maintenir aussi constante que possible la durée de cette unité de mesure et de la comparer à la seconde : on peut alors utiliser sans difficulté des méthodes qui, par leur imprécision, exigent des comparaisons de

temps à long terme (fréquences étalons radioélectriques sur ondes très longues) ou encore des mesures de différences de temps occasionnelles (transports d'horloges). La discussion générale des comparaisons de l'unité de mesure de TAI et de la seconde révélera tôt ou tard une divergence significative. La procédure suivante pourrait alors être adoptée : 1° l'ensemble des mesures est discuté par un comité ad hoc ; 2° si un ajustement paraît souhaitable, il pourrait être décidé d'effectuer un changement de fréquence de TAI à une date convenue, soit par modification progressive, soit par saut ; ma préférence irait à un ajustement par sauts aussi peu fréquents que possible, car cela facilite l'interprétation des mesures en cours lors de l'ajustement de fréquence.

III. TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL ET SYNCHRONISATIONS

Les complexités de notre conception présente de TAI proviennent de ce que TAI résulte de moyennes : cela implique l'usage de comparaisons de temps à distance (qui apportent leurs propres erreurs), de délais dus aux calculs et, par suite, interdit une synchronisation rigoureuse sur TAI. Peut-on concevoir une méthode différente ?

Il est évident que si, au point de référence choisi pour TAI, se trouvait une horloge-mère produisant TAI (ou un ensemble d'horloges avec procédé immédiat de prise de moyenne) et des appareils destinés à diffuser ses indications au niveau de précision demandé par les utilisateurs, la synchronisation des horloges-esclaves avec TAI serait effective. Une telle organisation ne paraît pas possible, en ce moment, sur une base internationale. Elle existe cependant localement (par exemple, station maîtresse et stations-esclaves d'une chaîne de Loran-C). Notre problème est donc d'établir une relation entre TAI et les systèmes à synchronisation interne.

En fait, ce problème a déjà été résolu à propos du Loran-C et de l'horloge maîtresse de l'U.S. Naval Observatory.

Rien n'oblige, en général, les systèmes à synchronisation interne très précise à avoir une relation quelconque avec TAI. Cependant, ces systèmes peuvent constituer un

moyen excellent de diffuser le temps et l'on souhaite qu'ils soient mis à la disposition des utilisateurs scientifiques ; il faut, bien entendu, que cela n'apporte qu'un minimum de contraintes à ces systèmes. Appelons TSY la base de temps d'un tel système. Les besoins des utilisateurs pourront être remplis si :

1° l'écart TAI — TSY reste inférieur à une tolérance convenue (plus large que les tolérances internes du système) ; à ces tolérances près, on aura donc immédiatement TAI par l'intermédiaire de TSY ;

2° TAI — TSY est publié et interpolable au niveau de précision de la définition réelle de TAI et TSY. Pour réaliser la condition 1°, il faut piloter TSY et extrapoler TAI — TSY ; c'est une des raisons pour lesquelles l'uniformité de TAI me paraît souhaitable.

IV. RÉSUMÉ

L'échelle de temps atomique international est indispensable pour les sciences de l'espace et pour l'épreuve des théories cosmogoniques.

Elle constitue un moyen d'étalonnage économique des horloges de laboratoires.

Elle constitue une base de synchronisation à niveau moyen de précision.

En vue de l'utilisation au niveau de précision le plus élevé, elle doit être définie comme temps-coordonnée localisé en un point conventionnel de la Terre.

Pour assurer une utilisation optimale des moyens, on doit rechercher une liaison étroite entre les systèmes à synchronisation interne et le temps atomique international. Cela exige que ce dernier soit aussi uniforme que possible.

(28 mars 1970)

ANNEXE S 6

Commentaires sur les questions de la consultation préalable par correspondance

Par G. M. R. WINKLER

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

1. L'expérience acquise par l'U.S. Naval Observatory (U.S.N.O.) dans le domaine des étalons atomiques de fréquence et des échelles de temps atomique est résumée à l'Annexe S 7. Il s'est avéré que des groupes d'horloges commerciales à jet de césium fabriquées en série, sélectionnées et fonctionnant de façon indépendante, pouvaient fournir une échelle de temps supérieure, quant à l'uniformité et à la fiabilité, à n'importe quelle horloge existante prise séparément. Cette échelle de temps concorde également, dans les limites de précision indiquées, avec la moyenne des quelques étalons de fréquence de laboratoire, de conception et fabrication particulières, actuellement disponibles.

On n'a décelé aucune dérive systématique des moyennes sur une durée d'observation actuellement limitée à 2 ans.

2. Échelle de temps atomique internationale

A la suite des Résolutions 4 et 5 des Commissions 4 et 31 de l'Union Astronomique Internationale (U.A.I.)⁽¹⁾,

(1) Trans. International Astronomical Union (Proc. 13th General Assembly, Prague, 1967), XIIIB, 1967, p. 182.

le Bureau International de l'Heure (B.I.H.) établit une échelle de temps atomique qui a fait les preuves de son utilité pour les comparaisons.

L'expérience est toutefois encore très limitée, car des comparaisons de grande précision ne sont devenues courantes qu'au cours des deux dernières années.

Il est par conséquent prématuré de recommander un changement important quelconque, en particulier parce que :

a) Le B.I.H. fonctionne admirablement bien à moindres frais.

b) Il n'existe aucun besoin autre que ceux qui sont satisfaits avec les dispositions actuelles.

c) Les échelles de temps pour l'usage général demeureront par nécessité un compromis. Une approche prudente entraînera le minimum de confusion et de lacunes dans les relations avec les autres disciplines.

3. Recommandations

Rôle du C.I.P.M. (C.G.P.M.), du B.I.H. (F.A.G.S., U.N.E.S.C.O.), du C.C.I.R. (U.I.T.) et de l'U.A.I. (U.G.G.I.).

La "seconde", comme unité SI de base, a été définie (implicitement) par la C.G.P.M. comme unité d'intervalle de temps "propre". L'étalon choisi est l'atome de césium et non pas un instrument particulier, marquant ainsi la tendance vers l'abandon d'étalons matériels.

En dehors de ces considérations de principe, il ne faut pas oublier les considérations pratiques touchant les mesures de fréquence de précision par rapport à une échelle de temps diffusée. Dans la plupart des régions du globe, on ne dispose du temps par signaux électroniques qu'avec une résolution d'environ 0,5 μ s. Il faut environ quatre jours pour obtenir une résolution de 1×10^{-12} . Un bon étalon à césium nous donne sur place cette précision en une heure. La situation est tout à fait semblable à la mesure d'une distance. La référence directe au mètre vaut mieux que le recours au système géodésique coordonné.

Toutefois, il faut faire correspondre intervalle de temps "propre" et une échelle de temps coordonné.

En conséquence, les questions qui se posent au C.I.P.M. et sur lesquelles le C.C.D.S. doit délibérer et

faire des recommandations, sont les suivantes :

a) Quelle est la fréquence du césium par rapport à une base commune de comparaison, c'est-à-dire le temps coordonné TAI (BIH) ?

b) Quelle est la précision avec laquelle on réalise cette fréquence du césium et quelles sont les causes présumées de désaccord ?

c) Recommander au B.I.H. (par le truchement d'un membre siégeant au Comité de direction) des détails comme :

(1) Pondération. Je recommande soit d'abandonner complètement la pondération, soit d'introduire à priori des poids proportionnels à $\sqrt{N_i}$, où N est le nombre d'horloges fonctionnant de façon indépendante dans l'établissement considéré (i).

(2) Réglages de fréquence. Je recommande que soient données au B.I.H. des directives précises pour se maintenir à 10^{-12} près d'une valeur convenue (la moyenne de tous les étalons indépendants).

Il est toutefois très important que l'échelle du B.I.H. soit aussi uniforme que possible dans l'intérêt de la continuité. Des réglages de fréquence ne doivent pas être effectués plus d'une fois tous les cinq ans.

(3) Recommander un lieu de référence, c'est-à-dire le géoïde, auquel doivent se rapporter les mesures de temps et de fréquence.

(4) Ne recommander aucun changement pour la date. Un changement pourrait être recommandé par les astronomes pour que TAI concorde mieux avec le temps des éphémérides. Toutefois cela est prématuré.

(5) Recommander des détails complémentaires sur la nature des renseignements qui doivent être diffusés par le B.I.H. et sur la façon d'effectuer cette diffusion.

d) Il ne semble pas nécessaire d'envisager de nouveaux programmes de travail compte tenu de l'effort considérable en ce domaine d'un certain nombre d'observatoires et de laboratoires nationaux. Il n'est pas nécessaire de multiplier ces efforts.

e) Il faut soutenir et aider l'abolition, prévue pour le 1er janvier 1972, de TUC décalé, et la diffusion de

signaux horaires améliorés (nouvelle forme de TUC) proches de TU. Les détails concernant la date des sauts, les codes pour la différence TU2-TUC, etc., doivent être recommandés par l'U.A.I. et le C.C.I.R. mais ne sont pas de la compétence du C.I.P.M.

f) Ce serait une aide, si l'emploi de multiples purement décimaux de la seconde pouvait être encouragé.

L'U.S.N.O. utilise un décompte continu des secondes (atomiques) ("continuous second count" : CSC). Nous trouvons grand avantage à utiliser ce décompte continu comme date dans de nombreuses opérations d'acquisition de données de notre horloge atomique. Il est difficile de concevoir quelle justification il y aurait d'utiliser des unités purement astronomiques comme l'heure, le jour ou l'année dans le cadre du SI.

g) En aucune façon il ne faut changer la définition de la seconde. Le césium est encore le meilleur choix et la définition doit rester celle d'un intervalle de temps "propre".

h) Financement et organisation. Le B.I.H. doit continuer à coordonner le temps et les activités connexes. L'organisation actuelle fonctionne extrêmement bien. S'il y a des difficultés de financement, les autres organisations internationales (C.G.P.M. et U.I.T. en plus de l'U.N.E.S.C.O.) doivent apporter leur contribution.

De plus, les grands centres horaires peuvent et doivent partager la charge du travail avec l'Observatoire de Paris comme cela se fait déjà.

ANNEXE S 7

L'échelle de temps de référence de l'U.S. Naval Observatory et les résultats de fonctionnement d'un groupe d'horloges atomiques

Par G. M. R. WINKLER, R. G. HALL et D. B. PERCIVAL

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

Résumé

L'échelle de temps atomique de l'U.S. Naval Observatory (U.S.N.O.) est basée sur l'exploitation de 16 étalons de temps à jet de césium, choisis pour être les meilleurs et situés à l'observatoire ; les étalons sont comparés à trois masers à hydrogène qui sont utilisés comme oscillateurs d'interpolation de très haute précision. Cette échelle de temps est uniforme à mieux que 1×10^{-13} près sur des durées atteignant un an ; elle est désignée par MEAN(USNO). Cependant, pour des raisons pratiques, tous les résultats de mesure publiés sont rapportés à une échelle coordonnée désignée par MC(USNO) (USNO Master Clock). L'écart de fréquence entre MEAN(USNO) et MC(USNO) n'a pas dépassé 1×10^{-13} en 1970.

Il est nécessaire de déduire l'échelle de temps d'une moyenne des indications d'un ensemble d'étalons de temps pour se prémunir contre les défauts de fonctionnement. Une pondération en fonction de la stabilité des étalons pendant des durées de cinq jours a été tentée, puis abandonnée. En effet, la pondération donne un rôle prédominant à

un petit nombre d'étalons et réduit l'intérêt de la moyenne; elle est basée sur les propriétés passées.

Dans la méthode retenue, les poids attribués aux étalons sont 1 ou 0. Le poids 0 est attribué aux étalons en cours d'essai et à ceux qui ont présenté des écarts de fréquence anormaux. Lorsqu'un étalon est abandonné ou introduit des corrections sont appliquées afin que MEAN(USNO) ne présente pas de sauts de temps ni de fréquence.

Les travaux de l'U.S.N.O. ont porté sur 45 étalons de temps à jet de césium de fabrication industrielle. Ils permettent de donner des indications sur le comportement de ces appareils :

- L'écart-type de fréquence d'un étalon, comparé à la moyenne de l'ensemble est $1,7 \times 10^{-12}$.

- La stabilité de fréquence sur 40 jours des étalons de bon comportement est de $3 \text{ à } 60 \times 10^{-14}$.

- Il y a eu en moyenne un arrêt d'étalon, par défaut de fonctionnement, pour six étalons en deux ans (les incidents au cours d'une période de deux mois d'essais n'étant pas comptés).

Note du B.I.P.M. - Le document dont le résumé est donné ci-dessus contient le formulaire utilisé par l'U.S.N.O., ainsi que plusieurs tables de valeurs numériques et des graphiques qu'il n'est pas possible de reproduire ici.

Ce document est publié en anglais dans Metrologia, 6, n° 4, 1970, pp. 126-134.

Sur la définition d'un « temps coordonnée » terrestre

Par O. COSTA DE BEAUREGARD

Institut Henri Poincaré, Paris

I. INTRODUCTION

La Conférence Générale des Poids et Mesures a récemment promulgué une définition de l'étalon du temps (on pourrait dire étymologiquement du "chrono-mètre") très directement reliée à la physique fondamentale (relativiste⁽¹⁾ et quantique) et qui est dans son principe la meilleure aujourd'hui possible.

Un second problème surgit alors du fait de l'existence de la métrique relativiste de l'espace-temps (dont le nouvel étalon tient compte par définition même) et de la répudiation corollaire du "temps universel" de Newton. Ce problème, somme toute analogue à celui de l'adoption d'un système de coordonnées géographiques pour l'ensemble de la Terre, est celui de l'adoption d'une

(1) Le fait même d'adopter une période et une longueur d'onde d'ondes électromagnétiques comme étalons respectifs de temps et de longueur fait de la célérité des ondes une constante absolue par définition. (Voir O. Costa de Beauregard, Metrologia, 4, 1968, p. 144).

"coordonnée temps"⁽²⁾ pour l'ensemble de la Terre.

Le schème, finalement simple et clair, que je vais proposer tient compte :

- de la nécessité des "corrections relativistes"⁽³⁾ à la précision aujourd'hui atteinte par la chronométrie ;
- de l'inutilité de rechercher dès à présent une rigueur analytique qui conduirait à des discussions longues et éventuellement sans issue.

Ce schème impliquera une sorte de généralisation du concept du "temps universel"⁽⁴⁾ tenant compte :

- de la "variation relativiste de la marche des horloges"⁽⁵⁾ en fonction du potentiel gravitationnel U de la Terre au lieu qu'elles occupent ;
- des variations de la vitesse angulaire de la Terre⁽⁶⁾.

Il reposera sur la proposition suivante : La "coordonnée temps"⁽²⁾ terrestre t sera fondamentalement le temps propre d'un idéal mobile ponctuel P , sans masse, coïncidant avec le centre de la Terre⁽⁷⁾. Dans un premier stade, on supprime donc par la pensée la masse de la Terre⁽⁸⁾ pour imaginer sa

(2) "Temps coordonnée" serait la locution adéquate ; à proprement parler une coordonnée n'est pas plus un temps qu'elle ne peut être une longueur. Si, à regret, nous parlons de "coordonnée temps", c'est pour éviter toute confusion avec le "temps coordonné" défini internationalement et dont le sens est différent.

(3) Ici encore nous nous soumettons au langage reçu : si la Relativité "corrige" l'expression newtonienne approchée, ce n'est pas son but, mais un résultat accessoire.

(4) Le "temps universel" TU était proprement une "coordonnée temps pour l'ensemble de la Terre".

(5) Encore une soumission à la façon de parler, qui se réfère (à tort) à la "coordonnée temps"⁽²⁾ au lieu de le faire aux temps propres des horloges. Ceux-ci sont ce qu'ils sont : des chrono-mètres, "imperturbables" par définition.

(6) Strictement parlant, celle-ci interviendrait dans le potentiel gravitationnel de la Terre (voir formule (1) de Clairaut-Helmert). Ce n'est pas à cela que nous faisons allusion ici, mais à l'incidence plus élémentaire sur la coordination des zéros des temps locaux.

(7) Les physiciens trouveront plus commode de se référer à la "coordonnée temps secondaire" définie dans la Section II. La "coordonnée temps fondamentale" est un intermédiaire de raisonnement utile.

(8) C'était déjà l'approximation faite en considérant la Terre comme une "particule d'épreuve" ; la refaire au sens présent revient à négliger le $Gm/c^2 r$ et le $\omega^2 r^2/c^2$ de la Terre (voir Section II).

trajectoire dans le repère spatial (R, φ, θ) de Schwarzschild centré sur le Soleil (repère qui est manifestement une généralisation relativiste du repère galiléen centré sur le Soleil ⁽⁹⁾).

Deux importants problèmes doivent alors être traités :

- Relation entre la "coordonnée temps" t et les temps propres $\tau(U)$ des horloges atomiques ou moléculaires sises aux différents points de la Terre : c'est cela le problème de la "coordonnée temps" terrestre.

- Relation entre la "coordonnée temps" terrestre t et la "coordonnée temps" centrale T de Schwarzschild dans le Système Solaire. Ce problème, impossible à éluder dès qu'on a à considérer des durées longues, implique un concept très voisin de celui du "temps des éphémérides" auquel on devra comparer la "coordonnée temps" terrestre t .

Ces deux problèmes seront brièvement envisagés aux Sections II et III.

II. LA "COORDONNÉE TEMPS" TERRESTRE t ET LES TEMPS PROPRES $\tau(U)$ DES HORLOGES ATOMIQUES OU MOLÉCULAIRES RÉPARTIES SUR LA TERRE

En toute rigueur il faudrait utiliser le ds^2 d'une masse en rotation, ce qu'on ne fera pas ici, la vitesse angulaire de la Terre étant faible. On prendra le potentiel gravitationnel sans dimension de la Terre sous la forme de Clairaut-Helmert :

$$(1) \quad U = c^{-2} \left\{ \frac{G}{r} \left[m - \frac{C-A}{r^2} \left(1 - \frac{3}{2} \cos^2 \lambda \right) \right] + \frac{1}{2} (\omega r \cos \lambda)^2 \right\}$$

où G désigne la constante universelle de Newton, c la vitesse de la lumière dans le vide, m la masse de la Terre, C et A les moments d'inertie de la Terre autour de l'axe des pôles et d'un axe équatorial, ω la vitesse angulaire de la Terre, r la distance au centre P de la Terre et λ la

(9) En termes relativistes il s'agit d'une projection tridimensionnelle particulièrement commode de la trajectoire quadridimensionnelle. On reviendra dans la Section III sur la description de cette trajectoire.

latitude du point H considéré (lié à la Terre).

Il est clair que le premier groupe de termes du $\{ \}$ est engendré par le g_{44} du potentiel gravitationnel einsteinien g_{ij} . Le second groupe de termes, représentant classiquement le potentiel de l'accélération centrifuge, est engendré par les autres termes diagonaux du g_{ij} , par l'intermédiaire de la vitesse du mobile H ; c'est ce qu'il sera utile de rappeler sur l'exemple du ds^2 de Schwarzschild, parce qu'un terme analogue devra être pris en considération lors des problèmes de transport d'horloges.

Rappelons l'expression du ds^2 de Schwarzschild

$$(2) \quad ds^2 \equiv c^2 d\tau^2 = c^2 \left(1 - \frac{2Gm}{c^2 r} \right) dt^2 - r^2 (d\lambda^2 + \cos^2 \lambda d\ell^2) - \frac{dr^2}{1 - \frac{2Gm}{c^2 r}},$$

où ℓ désigne la longitude (tous les autres symboles ayant été définis). Un point H lié à la Terre est tel que

$$(3) \quad dr = 0, \quad d\lambda = 0, \quad d\ell = \omega dt,$$

d'où pour ce point

$$(4) \quad \frac{d\tau}{dt} \approx 1 - \frac{Gm}{c^2 r} - \frac{1}{2} (\omega r \cos \lambda)^2 = 1 - U;$$

il y a bien équivalence entre (1) et (4) pour $C - A = 0$.

D'une façon générale, à l'approximation adoptée, la relation différentielle entre les différents temps propres $\tau(U)$ des horloges atomiques ou moléculaires liées à la Terre et la "coordonnée temps" t est :

$$(5) \quad \frac{d\tau(U)}{dt} = 1 - U,$$

une équipotentielle U_0 privilégiée en géodésie étant "la surface du géoïde". On pourra donc raisonnablement adopter une "coordonnée temps terrestre auxiliaire τ_0 " telle que :

$$(6) \quad \frac{d\tau_0}{dt} = 1 - U_0,$$

où U_0 désigne la valeur du potentiel de gravitation terrestre (1) sur la surface du géoïde.

Deux horloges H et K au repos sur une même équipotentielle "nombrent" un même temps $\tau(U)$. Cela veut dire que si, par exemple, H émet un signal modulé reçu par K le long d'une voie solidaire de la Terre, H et K comptent le même nombre de phases par unité de leurs temps propres. Une première opération simple dans le rattachement du temps propre τ_H d'une horloge H à la "coordonnée temps" t consistera donc à le convertir en "temps propre du géoïde" au moyen de la formule

$$(7) \quad \frac{d\tau_H}{d\tau_0} = \frac{1-U}{1-U_0} \approx 1 + U_0 - U.$$

Le problème important est celui soulevé par l'intégration des diverses équations (5) : comment associer entre elles les diverses constantes d'intégration k_H ? C'est cela le problème de la règle d'emploi de la coordonnée temps t (ou τ_0)⁽¹⁰⁾ ; et un problème dans lequel, soit dit en passant, la technique traditionnelle de la visée des astres passant au méridien a chance de retrouver sous une forme nouvelle une partie de son ancienne importance.

En effet, le problème de relier entre elles les diverses constantes d'intégration k_H serait tout de suite résolu si l'on connaissait :

- les différences des longitudes $l_{OK} - l_{OH}$, etc.
- la vitesse angulaire de la Terre $\omega(t)$.

Il suffirait alors (après avoir effectué la "correction de potentiel" impliquée dans la formule (5)) de procéder de la manière traditionnelle pour relier le "temps local" au "temps universel" en écrivant, pour l'instant de

(10) En langage de géométrie quadridimensionnelle, on considère les plans tridimensionnels localement orthogonaux à la trajectoire quadridimensionnelle de P et séparés entre eux par l'unité du temps t. La courbure et les torsions première et seconde de la trajectoire quadridimensionnelle étant faibles en termes de l'inverse du rayon terrestre, ces hyperplans peuvent être considérés comme parallèles entre eux. Un point H lié à la Terre décrit alors une hélice ayant pour axe la trajectoire de P ; pour un U donné, la longueur de l'arc intersecté par deux hyperplans consécutifs t et t + 1 vaut 1 - U. Coordonner entre elles les constantes d'intégration k, c'est faire en sorte que, pour toutes les hélices de même U, τ_H ait la même valeur sur un hyperplan t.

passage d'un même astre "fixe" au méridien :

$$(8) \quad \tau_K - \tau_H = \frac{\ell_{OK} - \ell_{OH}}{\omega(t)}, \quad \text{etc.}$$

Malheureusement, les $\ell_{OK} - \ell_{OH}$ ainsi que $\omega(t)$ figurent au nombre des inconnues du problème, qui se présente alors comme celui d'un mutuel ajustement "au mieux" des inconnues impliquées dans le système des formules (9), ajustement recourant évidemment à toutes les sources d'information valables (échos radar sur satellites, etc.).

Ma seule remarque soulignera que l'ensemble des formules (8), avec l'interprétation qui les sous-tend, et des formules (5) dont elles fixent en principe les constantes d'intégration, représentent les règles d'emploi de la coordonnée temps primaire t ou secondaire τ_o (8).

Note sur le transport d'horloges aux fins de comparaison. - Soit à comparer les états de deux horloges H et K liées à la Terre, en faisant successivement coïncider avec elles une horloge mobile L transportée de H en K, puis de K en H pour assurer l'indispensable fermeture. Dans cette opération intervient un "effet voyageur de Langevin" dû à ce que la trajectoire d'espace-temps de L diffère des deux hélices décrites par H et K (hélices qu'on peut rendre identiques par les "réductions au géoïde" $H \rightarrow H_o$ et $K \rightarrow K_o$).

Négligeant les termes quadratiques en $c^{-2} G/r$ et β^2 , et notant τ_L le temps propre de l'horloge transportée, nous pouvons écrire :

$$(9) \quad \frac{d\tau_L}{d\tau_o} = 1 + U_o - c^{-2} \left\{ \frac{G}{r} \left[m - \frac{C-A}{r^2} \left(1 - \frac{3}{2} \cos^2 \lambda \right) \right] + \frac{1}{2} \frac{dr^2 + r^2 (d\lambda^2 + \cos^2 \lambda d\ell^2)}{d\tau_o^2} \right\}$$

où, rappelons-le, ℓ désigne la longitude comptée à partir d'un méridien origine sidéral ; on remarque que, étant multiplié par le terme petit $\beta^2/2$, le potentiel de gravitation en $c^{-2} G/r$ ne figure pas dans le coefficient du dr^2 .

Pour avoir une idée de l'ordre de grandeur de cet effet, faisons $K \equiv H$, $\lambda \approx 45^\circ$, et imaginons que l'horloge L soit transportée de H en H le long du parallèle à l'altitude de 10 000 m, pendant le vol vers l'est, à 1 200 km/h.

Pendant le vol, H est sensiblement au repos dans un référentiel galiléen et l'on trouve, g désignant l'accélération moyenne due à la pesanteur

$$(10) \frac{d\tau_L}{d\tau_H} \approx 1 + c^{-2} g \Delta r + \frac{1}{2} (\beta_0^2 - \beta^2) \approx 1 + (1 + 0,5) \times 10^{-12}$$

Bien entendu, le nombre d'escalas intermédiaires de l'avion n'influe pas sur le résultat (dans la mesure où les parcours de montée et de descente restent négligeables). Il serait certainement intéressant de faire cette expérience. La seconde contribution corrective changerait de signe si le vol avait lieu vers l'ouest.

III. RELATION ENTRE LA "COORDONNÉE TEMPS" TERRESTRE t ET LA "COORDONNÉE TEMPS" CENTRALE T DE SCHWARZSCHILD

Adopter le ds^2 de Schwarzschild pour décrire le mouvement de la Terre autour du Soleil, c'est considérer celle-ci comme une "particule d'épreuve" dans le champ central de la masse m et négliger les potentiels gravitationnels de la Lune et des autres planètes.

La trajectoire spatiale de la Terre est alors l'ellipse képlérienne corrigée de l'avance du périhélie d'Einstein-Schwarzschild. Cette trajectoire, figurée en variables R, φ, θ de Schwarzschild, est paramétrée en temps central T de Schwarzschild. Elle peut être paramétrée aussi en temps propre t de la particule d'épreuve P figurant la Terre à cette approximation. On réalise ainsi l'équivalent d'une horloge céleste dont l'aiguille est P, le cadran l'écliptique et la graduation T ou t suivant la nature du problème à traiter⁽¹¹⁾.

A l'approximation suivante, il faudra tenir compte des potentiels gravitationnels des autres corps du Système Solaire, dont les plus importants sont ceux de la Lune et de Jupiter. Ils causent en premier lieu une déformation de la trajectoire et de la loi de mouvement de la Terre, qu'il suffira de traiter d'abord à l'approximation newtonienne

(11) Costa de Beauregard (O.), J. Physique, 18, 1957, p. 17.

(la présence de la Lune causant un festonnement du lieu de P relativement à l'ellipse képlérienne). On a expliqué plus haut qu'en négligeant les termes quadratiques en β^2 et $Gm/c^2 r$, le β^2 restera le même qu'à l'approximation euclidienne et newtonienne, ce qui rend élémentaire le calcul du $d_1 t/dt$ résultant de cette correction cinématique. Plus délicat est le problème du calcul du $d_2 t/dt$ dû au champ statique de la Lune ou de Jupiter ; il requerra certainement l'élaboration de méthodes d'approximation.

Quelques principes concernant les codes qui donnent les différences de temps entre TU et TAS*

Par G. BECKER

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Allemagne)

1. Le codage doit être compatible avec les types de signaux horaires actuellement en usage.

Les utilisateurs qui n'ont aucun renseignement sur l'introduction du code ne doivent pas être gênés par les signaux codés. Il faut éviter le danger de confondre les signaux codés avec les marqueurs de minute. Il est souhaitable que les marqueurs de temps y compris les signaux codés puissent être utilisés comme signaux horaires émis.

2. Le codage devrait être conçu de façon à rendre possible la lecture des informations codées sans nécessiter l'aide d'une horloge.

3. Compter un petit nombre (< 10) de signaux codés semble être un procédé convenable de lecture.

4. Un dispositif électronique simple devrait être capable de lire le code et d'afficher numériquement la différence TU-TAS.

* TAS = Système de temps atomique avec sauts de 1 s, qui doit être introduit par le C.C.I.R.

5. Les informations codées devraient être exprimées complètement par le même type de modulation.

Si les informations étaient données en partie par la modulation d'une fréquence audible et en partie par des coupures de l'onde porteuse, il serait plus difficile de lire le code.

6. Un dispositif électronique simple devrait permettre d'utiliser les informations codées de façon que les signaux TU (approchés) soient produits par l'installation réceptrice.

7. Bien que différents codages puissent être nécessaires, leur schéma de base devrait si possible être le même.

8. Le signe de la différence entre TU et TAS devrait être exprimé clairement par un type de code significatif.

9. Il est souhaitable que les marqueurs de minute soient, de quelque façon, "annoncés" à l'utilisateur (ou à un dispositif électronique) pour qu'il les distingue des marqueurs de seconde.

Si la minute ronde précise est définie par le commencement d'un marqueur de minute, il n'est pas possible de repérer cet instant et de l'utiliser pour des mesures sauf en comptant jusqu'à 60 à partir du marqueur de minute de la minute précédente.

Malheureusement la plupart des types d'émission de signaux horaires utilisent des marqueurs de minute sans avertissement. Compte tenu du principe énoncé au point 1, le problème se pose de modifier cette situation maintenant.

Remarques concernant le codage proposé

1. On suppose qu'en pratique TU-TAS doit être seulement exprimé en multiples entiers de 0,1 s. Le code proposé peut néanmoins être utile si 1 s des signaux codés correspond à 0,05 s pour TU-TAS.

2. On suppose que les informations codées doivent être données une fois par minute. On devrait demander aux utilisateurs de TU si une information codée une fois par heure est suffisante.

Émission de signaux horaires sur ondes kilométriques (fig.1)

Les signaux horaires sur ondes kilométriques sont pour la plupart produits par coupures de l'onde porteuse. Le commencement de la coupure définit les secondes ou les minutes. C'est une situation qui n'est pas très commode. Si l'on choisissait la pente positive au lieu de la pente négative, cela présenterait quelques avantages :

1. La pente positive est souvent plus abrupte que la pente négative ; elle est donc mieux appropriée pour définir un instant.

2. La pente négative est moins stable à cause de la superposition d'ondes célestes. La pente positive favorise l'onde de sol.

3. La pente négative peut être utilisée comme une annonce électronique de la pente positive qui la suit, ce qui permet d'utiliser une modulation d'amplitude (à une fréquence acoustique) pour les signaux codés (et pour des signaux d'appel) pendant la présence de l'onde porteuse. On peut également réaliser une annonce du marqueur de minute (fig. 1, e).

Caractéristiques du code proposé (fig. 1)

1. La séquence des marqueurs de la seconde TA (a) n'est pas interrompue.

2. L'information de TU (marqueur de minute et signaux codés) est exprimée par modulation (b, c).

3. Le code est donné par modulation et peut être interprété par comptage sans l'aide d'une horloge.

4. Le code est significatif : si le signal codé précède le marqueur de minute, la minute TU (qui est donnée par le code) précède le marqueur de minute.

5. La sélection du marqueur de minute (a) nécessite un comptage jusqu'à 60 à partir du marqueur de minute précédent ou l'introduction d'une annonce de ce marqueur de minute (d, e)

Fig. 1.- Time Signals of LF-Transmitters

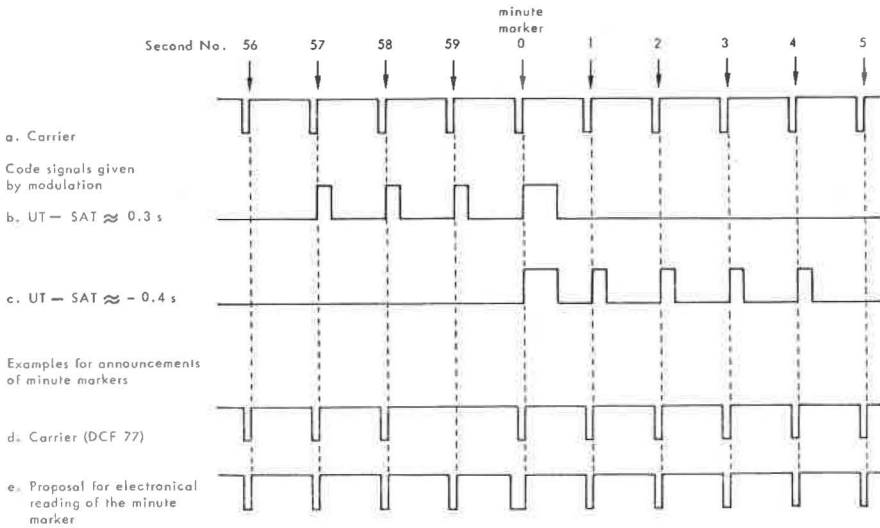
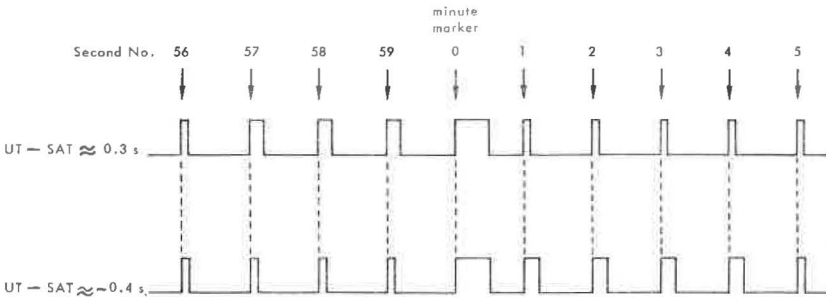


Fig. 2.- Time Signals by Modulation



Signaux horaires par modulation (fig. 2)

Le code est exprimé par la largeur des marqueurs de seconde.

Comme le commencement des marqueurs définit les secondes ou les minutes, une sélection des marqueurs de minutes n'est possible que par comptage. L'introduction d'un procédé d'annonce serait en contradiction avec le principe énoncé au début au point 1.

**Commission préparatoire
pour la coordination internationale des échelles de temps**

Rapport au Comité International des Poids et Mesures *

Par J. BONANOMI

Cette Commission préparatoire a été constituée en vue d'une mise en application éventuelle de la Recommandation S 3 adoptée par le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde à sa 4^e session (juillet 1967). Elle comprend un petit nombre de personnes expertes dans les questions en cause, bien au courant des organismes qui s'occupent des émissions de fréquences étalons et des signaux horaires, et renseignées sur les besoins des différentes catégories d'usagers.

La Commission s'est réunie au Pavillon de Breteuil, à Sèvres, les 10 et 11 octobre 1968, sous la présidence de Mr L. E. Howlett, président du Comité International des Poids et Mesures (C.I.P.M.). Toutes les personnes invitées par le C.I.P.M. avaient répondu à son invitation.

Étaient présents : L. E. HOWLETT, président.

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

G. BECKER, Physikalisches Technische Bundesanstalt [P.T.B.], Braunschweig;

J. BONANOMI, Observatoire Cantonal de Neuchâtel, Neuchâtel;

B. DECAUX, Centre National d'Études des Télécommunications [C.N.E.T.], Bagnaux;

V. I. ERMAKOV, Comité National des Normes, des Mesures et Instruments de Mesure, Moscou;

L. ESSEN, National Physical Laboratory [N.P.L.], Teddington;

B. GUINOT, Bureau International de l'Heure, Paris;

J. T. HENDERSON, Conseil National de Recherches [N.R.C.], Ottawa;

D. H. SADLER, Nautical Almanac Office, Hailsham;

H. M. SMITH, Nautical Almanac Office, Hailsham;

Ch. STETTLER, Commission d'Études VII du Comité Consultatif International des Radiocommunications [C.C.I.R.], Genève;

J. TERRIEN, Bureau International des Poids et Mesures [B.I.P.M.], Sèvres;

G. W. WINKLER, U. S. Naval Observatory, Washington.

* Rapport présenté à la 57^e session (octobre 1968) du C.I.P.M. et publié dans *Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 36, 1968, p. 109.

À l'ouverture de la séance, le président expose les raisons qui ont provoqué cette réunion : à la suite de l'adoption de la nouvelle définition de l'unité de temps par la Treizième Conférence Générale des Poids et Mesures, le C.I.P.M. a reçu des demandes le priant de s'occuper aussi de la façon dont le temps est rendu accessible aux usagers, c'est-à-dire, pratiquement, des améliorations possibles du système TUC (temps universel coordonné) actuellement en vigueur.

Avant d'entreprendre une action quelconque dans un domaine nouveau, le C.I.P.M. a pour politique de s'assurer au préalable que cette action répond à un besoin important, et qu'elle ne peut pas être entreprise par d'autres organismes existants. Le C.I.P.M. a donc invité quelques experts à se réunir afin qu'ils lui fassent connaître leurs avis sur les difficultés à résoudre, les solutions à envisager, et les actions à entreprendre. Sur la demande du président, MM. Essen, Sadler et Winkler ont rédigé des documents destinés à servir de base aux discussions. Ces documents ont été diffusés aux membres de la Commission en mai 1968.

Le système TUC (temps universel coordonné) actuellement en vigueur est une forme altérée volontairement du temps atomique, conçue de telle façon que le TUC reste voisin du TU2 (temps universel défini par la rotation de la Terre). Les pays qui adhèrent au système TUC diffusent et utilisent le même temps à moins de 1 ms près. Afin de maintenir l'écart entre TUC et TU2 inférieur à 0,1 s, la fréquence dont sont déduits les signaux horaires est décalée; en plus de ce décalage de fréquence, il est nécessaire d'effectuer de temps en temps des sauts brusques d'état des signaux horaires, la valeur de ces sauts étant un multiple entier de 0,1 s. Un grand nombre de pays ont adopté ce système.

MM. Essen et Winkler donnent un résumé de leurs arguments qui font ressortir les défauts du système TUC actuellement en vigueur et proposent des améliorations.

Le document soumis par Mr Sadler est le résultat d'une enquête effectuée parmi les usagers des signaux horaires. On peut le résumer en constatant qu'il existe un besoin limité pour des signaux horaires ne s'écartant pas du temps universel TU2 de plus de 0,1 s, qu'un nombre appréciable d'applications requièrent un écart inférieur à 0,25 s, que la majorité des usagers pourraient s'accommoder d'un écart allant jusqu'à 0,5 s, mais que des écarts plus grands seraient hautement indésirables.

Mr Smith expose son point de vue, en sa qualité de président du groupe de travail créé par la Commission d'Études VII du C.C.I.R. pour enquêter sur les besoins et les avis de tous les utilisateurs et élaborer si possible le projet d'un système nouveau. Il se réfère au document VII/70 qui contient les conclusions de la réunion C.C.I.R. de juillet 1968 à Boulder (Colorado) et il exprime le vœu que les débats de la présente réunion faciliteront une nouvelle rédaction du document 374 du C.C.I.R., document qui pourrait être soumis à la Conférence générale du C.C.I.R. en janvier 1970.

Les résultats des discussions ultérieures sont résumés dans les conclusions de la réunion; ces conclusions (p. 112) ont été adoptées à l'unanimité des membres présents. Il y a lieu de noter toutefois que Mr Sadler, empêché de participer à la séance du 11 octobre, avait annoncé préalablement qu'il ferait des réserves à l'égard de toute solution qui proposerait d'augmenter les sauts de 0,1 s actuellement appliqués.

Le point le plus important des conclusions de la réunion est le vœu unanime d'abandonner les décalages (« offset »).

Le deuxième point en ordre d'importance est la reconnaissance de deux systèmes TUC qui pourraient coexister sans inconvénient majeur. Ces deux systèmes proposés au cours des discussions visent à maintenir l'accord TUC — TU2 inférieur à environ 0,5 s et impliquent des sauts de temps dans la succession des signaux horaires. La différence des deux systèmes porte sur la date et l'amplitude de ces sauts.

Le premier système prévoit des sauts de 1 seconde entière à effectuer au début d'un mois de calendrier après avoir été annoncés deux mois au préalable par le Bureau International de l'Heure (B.I.H.). L'avantage de ce système est double : les sauts sont exactement égaux à l'unité de temps, donc l'intervalle entre deux signaux quelconques est toujours un multiple entier de l'unité de temps; la simplicité de sa mise en œuvre constitue le second avantage. Les avocats de ce système ont été surtout MM. Winkler, Barnes, Becker, Essen.

Le deuxième système prévoit d'effectuer les sauts de temps à des dates fixes (par exemple 1^{er} janvier de chaque année). Si la rotation de la Terre continue à évoluer comme au cours des dernières années, il suffira d'effectuer un seul saut chaque année; si nécessaire un deuxième saut pourrait intervenir, par exemple le 1^{er} juillet. L'amplitude des sauts sera un multiple entier de 0,2 s. Ce système a l'avantage de faciliter la diffusion préalable de l'information concernant l'amplitude du saut et évite par la date fixe la possibilité qu'un saut passe inaperçu d'un usager. Ce deuxième système, défendu par Mr Ermakov, a été reconnu en U.R.S.S. comme étant le meilleur compromis.

Le problème de l'extrapolation de la vitesse de rotation de la Terre pour prévoir correctement la date ou l'amplitude du saut est à peu près équivalent pour les deux systèmes.

Un groupe de travail composé de MM. Guinot, Barnes et Ermakov s'est réuni afin de chercher à éliminer un des deux systèmes en faveur de l'autre. Il a été toutefois reconnu que les exigences des avocats de l'un et l'autre système sont inconciliables et qu'il ne sera pas possible de proposer un système unique. Il a cependant aussi été reconnu que la coexistence de ces deux systèmes ne serait pas très nuisible à la condition que le B.I.H. coordonne l'application des deux systèmes.

Les deux systèmes imposent, en plus de l'annonce des sauts par des publications écrites, une information radioélectrique par un codage simple permettant de connaître à 10 ms près les écarts entre les signaux horaires et le TU2.

Il a été envisagé aussi que le deuxième système, afin de le rendre compatible avec le premier, adopte des sauts de 1 seconde entière plutôt que des multiples de 0,2 s. Le désavantage d'une telle solution est qu'elle implique des écarts TUC — TU2 plus grands que 0,5 s et pouvant atteindre la seconde entière.

La discussion a porté encore sur la question de savoir si l'on pourrait introduire, tôt ou tard, le temps atomique pur dans lequel on abandonnerait non seulement les décalages, mais aussi les sauts de temps. Actuellement, il faut constater que des difficultés pratiques s'opposent d'une façon péremptoire à l'introduction du temps atomique pur; ces difficultés proviennent

du fait que les corrections TA (temps atomique) — TU2 deviendraient très importantes et qu'il ne suffirait pas d'en informer l'utilisateur par un codage ajouté aux signaux horaires. En effet, beaucoup d'utilisateurs utilisent des signaux horaires secondaires (horloges parlantes ou radiodiffusion par exemple) où l'information concernant l'écart ne peut être ajoutée. Il deviendrait dès lors nécessaire de publier les corrections préalablement dans les almanachs nautiques et autres moyens de navigation, ce qui est impossible à cause de la nature imprévisible de ces corrections.

La discussion a aussi porté sur la tâche d'importance croissante que devra accomplir à l'avenir le B.I.H. Le budget du B.I.H. est actuellement assuré à raison de 80 à 90 % par l'Observatoire de Paris. Si la tâche du B.I.H. est effectuée dans l'intérêt d'un nombre croissant de pays, il serait logique de rechercher aussi une assise financière assurée par ces mêmes pays; cela impliquerait d'autre part une modification du statut administratif du B.I.H.

La question de la date à laquelle un nouveau système TUC amélioré pourra être introduit a également été débattue. MM. Ermakov, Winkler, Stettler et Smith ont tous reconnu que pour des raisons diverses il sera difficile d'introduire le nouveau système avant le 1^{er} janvier 1971, mais que cette date devait être fermement envisagée.

Conclusions

Les principales conclusions de la Commission peuvent être résumées comme suit :

1. Il existe un besoin d'améliorer les conventions qui définissent le temps universel coordonné TUC.

2. Une amélioration souhaitable serait :

a) de renoncer au décalage des fréquences;

b) et de maintenir entre les signaux horaires des intervalles exacts de temps atomique.

3. On reconnaît que l'écart entre les signaux horaires et le TU2 ne devrait pas excéder environ 0,5 s.

4. L'abandon du décalage de fréquence impose donc de temps en temps des sauts de temps dans la succession des signaux horaires et des décisions sur la date et l'amplitude de ces sauts.

5. En plus de l'annonce des sauts par des publications écrites, il est nécessaire de fournir une information radioélectrique par un codage simple permettant de connaître à 10 ms près les écarts entre les signaux horaires et le TU2.

6. Au sujet des décisions à prendre mentionnées au paragraphe 4, les participants de la Commission ont pris en considération les avantages et les inconvénients, pour les diverses catégories d'utilisateurs, de plusieurs systèmes proposés. Bien qu'un système unique soit préférable, ils considèrent qu'il n'y a pas d'inconvénient majeur à la coexistence de deux systèmes distincts, l'un comportant des sauts d'amplitude variable à des dates

prédéterminées, l'autre des sauts de 1 s à des dates variables, à la condition que l'écart entre les deux systèmes soit un multiple entier de 200 ms. Pour toutes ces questions et les questions connexes, il est important que le B.I.H. accomplisse son rôle coordinateur; il serait donc souhaitable qu'il reçoive les moyens d'action nécessaires.

7. La Commission exprime le vœu que le C.I.P.M. prenne les initiatives qu'il estimera appropriées pour hâter la conclusion d'un accord international sur l'amélioration du TUC.

(Octobre 1968)

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA DÉFINITION DE LA SECONDE 5^e Session (1970)

	Pages S
Avertissement historique	5
Liste des membres	7
Ordre du jour	10
Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par B. Guinot	11
1. Progrès des étalons atomiques de fréquence (Travaux accomplis dans les laboratoires; laser He-Ne stabilisé par absorption saturée dans le méthane; étalons à jét de Cs; maser à H)	12
2. État actuel des échelles atomiques de temps fondées sur la définition de la seconde (Échelle moyenne du B.I.H.; échelle de l'U.S. Naval Observatory; système Loran-C. Discussion)	13
3. Définition d'une échelle de temps atomique international tenant compte, en particulier, des effets relativistes (Échanges de vues et problèmes soulevés; commission chargée de rédiger la définition du « temps atomique international »; propositions diverses)	16
4. Maintien et diffusion de l'échelle de temps atomique international. Tâches respectives du B.I.H. et du B.I.P.M. Problèmes financiers	18
5. Questions soulevées par l'existence conjointe d'échelles astronomiques de temps	20
6. Questions diverses (Indications sur les systèmes envisagés de prévention des collisions aériennes)	20
Recommandations présentées au Comité International des Poids et Mesures :	
<i>Recommandation S 1</i> (1970) (Proposition d'adoption d'une échelle de temps atomique international)	21
<i>Recommandation S 2</i> (1970) (Proposition de définition du temps atomique international)	22

Recommandations S 3 (1970) et S 4 (1970) (Poursuite des recherches sur les étalons atomiques de fréquence et sur les méthodes d'évaluation du temps atomique international) 22

Règles pour la mise en pratique du temps atomique international 22

Annexes

S 1. *Documents présentés à la 5^e session du C.C.D.S.* 24

S 2. *Consultation préalable par correspondance (Réponses à un questionnaire du B.I.P.M.)* 28

— Étalons de fréquence (à césium et autres): performances actuelles et progrès (Questions 1 a, 1 b, 1 c: pp. S 29 à S 45).

— Échelle de temps atomique; importance de la définition d'une échelle de temps atomique international; effets relativistes (Questions 2 a, 2 b, 3 a, 3 b: pp. S 45 à S 68).

— Rôle du Comité International et du Bureau International des Poids et Mesures, et arrangements avec le Bureau International de l'Heure en relation avec l'établissement, le maintien et la diffusion du temps atomique international (Questions 4 a, 4 b: pp. S 68 à S 82).

— Problèmes que pose la coexistence du TA, du TU et du TUC utilisé pour la diffusion de plusieurs signaux horaires (Question 5: pp. S 82 à S 87).

S 3. D.A.M.W. (Allemagne). — *Rapport au B.I.P.M. pour la 5^e session du C.C.D.S.*, par M. Kalau 88

S 4. N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — *Commentaires sur une échelle de temps atomique internationale*, par J. A. Barnes 93

S 5. B.I.H. — *Commentaires sur l'utilisation du temps atomique*, par B. Guinot 97

S 6. U.S. Naval Observatory. — *Commentaires sur les questions de la consultation préalable par correspondance*, par G. M. R. Winkler 103

S 7. U.S. Naval Observatory. — *L'échelle de temps de référence de l'U.S. Naval Observatory et les résultats de fonctionnement d'un groupe d'horloges atomiques (Résumé)*, par G. M. R. Winkler, R. G. Hall et D. B. Percival 107

S 8. *Sur la définition d'un « temps coordonné » terrestre*, par O. Costa de Beauregard 109

S 9. P.T.B. (Allemagne). — *Quelques principes concernant les codes qui donnent les différences de temps entre TU et TAS*, par G. Becker 117

S 10. *Commission préparatoire pour la coordination internationale des échelles de temps (Rapport au Comité International des Poids et Mesures, 1968)* 121

IMPRIMERIE DURAND

28-LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1971, n° 1302

Dépôt légal, Éditeur, 1971, n° 13

ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 16-11-1971

Imprimé en France